

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN : 1268-4783
Série trimestrielle • n°87- Juillet 2017

Rédaction

Conseil général de l'Economie, de l'Industrie,
de l'Energie et des Technologies, Ministère de
l'Economie
120, rue de Bercy - Télédock 797 - 75572 Paris Cedex 12
Tél : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

François Valérian
Rédacteur en chef

Gérard Comby
Secrétaire général

Delphine Mantiene
Secrétaire générale adjointe

Liliane Crapanzano
Assistante de la rédaction

Marcel Charbonnier
Correcteur

Myriam Michaux
Webmestre

Membres du Comité d'Orientation

Le Comité d'Orientation est composé des membres
du Comité de Rédaction et des personnes dont les
noms suivent :

Jacques Brégeon
Collège des hautes études de l'environnement
et du développement durable, ECP, INA P-G, SCP-EAP

Christian Brodhag
École nationale supérieure des Mines de Saint-Étienne

Xavier Cuny
Professeur honoraire Cnam, Conseil supérieur
de la prévention des risques professionnels

William Dab
Cnam, Professeur

Thierry Chambolle
Président de la Commission « Environnement »
de l'Académie des technologies

Hervé Guyomard
CNRA Rennes

Vincent Lafèche
Président du BRGM

Yves le Bars
Cemagref

Patrick Legrand
Inra

Benoît Lesaffre
CIRAD

Geneviève Massard-Guilbaud
École des Hautes études en sciences sociales,
Directrice d'études

Marc Mortureux
Directeur général de la prévention des risques (MTES)

Alain Rousse
Président de l'AFITE

Virginie Schwartz
Directrice de l'Énergie, MTES

Membres du Comité de Rédaction

Pierre Couveinhes
Président du Comité de rédaction
Ingénieur général des Mines

Pierre Amouyel
Ingénieur général des Mines honoraire

Paul-Henri Bourrelier
Ingénieur général des Mines honoraire, Association
française pour la prévention des catastrophes naturelles

Mireille Campana
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie
Haut fonctionnaire de développement durable

Dominique Dron
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Pascal Dupuis
Chef du service du climat et de l'efficacité énergétique,
Direction générale de l'énergie et du climat, MTES

Jérôme Goellner
Chef du service des risques technologiques,
Direction générale de la prévention des risques, MTES

Jean-Luc Laurent
Directeur général du Laboratoire national de métrologie et
d'essais (LNE)

Richard Lavergne
Conseil général de l'Économie
Ministère de l'Économie

Philippe Saint Raymond
Ingénieur général des Mines honoraire

Bruno Sauvalle
Ingénieur en chef des Mines, Mines ParisTech

Jacques Serris
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Claire Tutenuit
Déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (EPE)

François Valérian
Rédacteur en chef des Annales des Mines

Photo de couverture :
Arbre dont le feuillage reprend la forme des continents.
Image numérique.
Photo © Jacques Beauchamp/PHOTONONSTOP

Iconographie
Christine de Coninck

Abonnements et ventes
COM & COM
Bâtiment Copernic - 20 Avenue Edouard Herriot
92350 LE PLESSIS ROBINSON
Alain Bruel
Tél. : 01 40 94 22 22 - Fax : 01 40 94 22 32
a.bruel@cometcom.fr

Mise en page : Nadine Namer

Impression : Printcorp

Editeur Délégué :
FFE - 15 rue des Sablons 75116 PARIS - www.ffe.fr
Fabrication : Charlotte Crestani
charlotte.crestani@belvederecom.fr - 01 53 36 20 46

Régie publicitaire : Belvédère Com

Directeur de la publicité : Bruno Slama - 01 40 09 66 17
bruno.slama@belvederecom.fr

Transition numérique et transition écologique

05

Avant-Propos

Laurence MONNOYER-SMITH

08

Introduction

Hélène SERVEILLE et Richard LAVERGNE

Numérique et écologie : deux domaines en transition

13

Faire converger les transitions numérique et écologique

Damien DEMAILLY, Renaud FRANCOU, Daniel KAPLAN
et Mathieu SAUJOT

17

Comment transition numérique et transition écologique
s'interconnectent-elles ?

Patrice GEOFFRON

20

Les réseaux électriques intelligents : un marché
aux frontières de l'énergie et de la domotique

Ivan FAUCHEUX

24

La « *Digital Society* » : un scénario de transition
énergétique à l'horizon 2072

Nadia MAÏZI, Edi ASSOUMOU et Thomas LE GALLIC

Le numérique, outil et accélérateur de la transition énergétique ?

28

Numérique et énergie, entre rêve et réalité

Alain BOURDIN

31

Numérique et transition énergétique

Laurent MICHEL et Guillaume MEHEUT

35

Enjeux et opportunités de l'ouverture des données
publiques en matière d'énergie

Sylvain MOREAU

39

La baguette numérique de la Fée Électricité

Patrick MORILHAT et Thomas BLADIER

43

L'énergéticien du XXI^e siècle : le numérique au service
du consommateur et de la transition énergétique

Fabien CHONÉ

45

La révolution numérique, au cœur de la transformation
d'ENGIE

Gilles BOURGAIN, Philippe SAINTES, Vincenzo
GIORDANO, Étienne GÉHAIN et Maxime WEISS

50

Réussir la transition énergétique en utilisant les leviers
de l'innovation

Jérôme SCHMITT

54

Digitalisation et gestion ouverte des données : de
nouveaux horizons pour les distributeurs d'électricité

Michel DERDEVET

59

Premier *microgrid* de quartier à énergie partagée,
RennesGrid® est le préfigurateur de la transition
énergétique à l'échelle territoriale

Thierry DJAHEL

63

La maîtrise de l'empreinte énergétique des services
informatiques et des réseaux en entreprise

Laurent BENATAR

68

La place du numérique dans les feuilles de route
de prospective énergétique de l'Agence Internationale
de l'Énergie

Kamel BEN-NACEUR

Transition numérique et transition écologique

Au-delà de l'énergie : numérique et environnement

72
Numérique et écologie
Françoise BERTHOUD

76
Numérique et recherche environnementale :
quelles évolutions ?
François JACQ et Benoît FAUCONNEAU

80
La photonique (la maîtrise de la lumière) au cœur
de la transition écologique
Karl GEDDAMUDROV

83
Les services Copernicus Atmosphère (CAMS) : une
révolution numérique au service de l'environnement
Laurence ROUÏL

87
Numérique et agriculture de précision
Jean-Paul BORDES

94
Le point de vue d'une ONG environnementale
Morgane CRÉACH

98
Accelerating Energy & Environmental Transition
in Europe through digital
Julia REINAUD, Nicolas CLINCKX and Paul FARAGGI

105
Peut-on croire aux TIC « vertes » ?
Fabrice FLIPO

HORS DOSSIER

110
Gouverner les politiques de l'eau
Aziza AKHMOUCH et Delphine CLAVREUL

114
Agences de l'eau : rétrospection prospective
Bernard BARRAQUÉ et Patrick LAIGNEAU

121 Traductions des résumés

133 Biographies des auteurs

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. »
correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos
recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le dossier est coordonné par Richard Lavergne et Hélène Serveille

LIGHTER WEIGHT CLEANER MOBILITY

MORE ECO-EFFICIENT
POLYMER AND COMPOSITE
SOLUTIONS FOR LIGHTER
YET SAFER VEHICLES.



**ASKING MORE
FROM CHEMISTRY**

WWW.SOLVAY.COM



SOLVAY

asking more from chemistry®

Transition numérique et transition écologique

Par Laurence MONNOYER-SMITH

Commissaire générale au Développement durable, déléguée interministérielle au Développement durable

Transition écologique et transition numérique ont un point commun, elles décrivent toutes deux un processus de « transformation au cours duquel un système passe d'un régime d'équilibre à un autre »⁽¹⁾. Chacune dans leur écosystème, ces deux transitions entraînent une profonde mutation des modes d'action des acteurs et des infrastructures qui organisent leurs relations, perturbant fortement les systèmes complexes dans lesquels elles émergent.

La transition écologique repose sur la double prise de conscience de la finitude des ressources sur lesquelles repose la croissance économique mondiale et de l'empreinte environnementale issue de notre consommation énergétique. La transition numérique résulte, quant à elle, d'innovations techniques, dont l'une des conséquences essentielles est de fonder la création de la valeur davantage sur la production et sur l'analyse des données que sur la production de biens et de services. Au-delà des caractéristiques communes à ces deux transitions, qui émanent de leur caractère disruptif et qui mettent ainsi en cause l'ensemble de la chaîne de valeur qui leur est associée, il est intéressant de s'interroger sur ce qu'elles nous apprennent l'une de l'autre.

Si chacune de ces transitions emporte des conséquences pour nos modes de production et de consommation, elles se nourrissent également l'une de l'autre : les valeurs qui sont portées par la transition numérique se traduisent par des attentes et des manières de faire sur lesquelles s'appuie la transition écologique. De la même manière, les contraintes qui sont prises en charge par la transition écologique s'imposent avec la même acuité à l'ensemble des acteurs du numérique. Aucune transition ne se fera sans l'autre, et c'est à la croisée de ces deux révolutions que doit s'inventer la société de demain. Faute de quoi, c'est non seulement vers une aporie que nous nous dirigerons, mais également vers un monde profondément inégalitaire, conflictuel et marqué par une détérioration irrémédiable de nos conditions de vie.

Quels fondamentaux de la transition numérique la transition écologique doit-elle impérativement prendre en considération ?

Il s'agit moins, ici, d'insister sur la dimension d'innovation technologique et sur les bouleversements socioéconomiques qu'induit l'introduction de processus de numérisation dans toutes les activités humaines que de souligner les caractéristiques spécifiques de la *culture numérique* en tant que celle-ci décrit un ensemble de valeurs, de comportements et de pratiques. Sans du tout se situer dans une approche déterministe qui placerait dans la technologie elle-même l'origine de ces valeurs et de ces pratiques, les travaux, par exemple, de Lev Manovitch⁽²⁾, de Robert Jenkins⁽³⁾ ou de Mark Deuze⁽⁴⁾ mettent en évidence une congruence entre le développement de nouveaux usages (par exemple, culturels : journalistiques, musicaux, muséaux, ludiques) et le déploiement d'outils numériques ; l'un et l'autre se renforçant mutuellement et diffusant leurs systèmes de valeurs dans tous les espaces publics et privés où se déploient ces technologies, selon les modèles de traduction bien décrits par la sociologie latourienne⁽⁵⁾.

Selon Mark Deuze, la culture numérique comporte trois dimensions : elle se caractérise par le *bricolage*⁽⁶⁾, c'est-à-dire la faculté de réaliser en permanence un mélange de contenus d'origines très diverses. Le caractère manipulable des contenus numériques permet en effet des assemblages et des montages selon des logiques empruntées aux différents médias. La production expressive des générations du millénaire sur tous les réseaux sociaux en constitue un exemple frappant. La *remédiation* décrit le processus d'évolution des objets numériques comme un mélange intégrant anciens et nouveaux médias avant que ne se déploie une sémiotique spécifique au nouveau média. Ainsi, le passage du journal papier au journal électronique s'est d'abord traduit par une simple numérisation du papier, avant que ne soient inventées des interfaces

(1) BOURG D. et PAPAUX A. (dir.), Dictionnaire de la pensée écologique, article « Transition », 2015.

(2) MANOVICH L., The language of new media, Cambridge: MIT Press, 2001.

(3) JENKINS H. (2004), "The cultural logic of media convergence", International Journal of Cultural Studies 7(1), pp. 33-43.

(4) DEUZE M. (2006), "Participation, Remediation, Bricolage: Considering Principal Components of a Digital Culture", The Information Society 22(2), pp. 63-75.

(5) Du philosophe Bruno Latour.

(6) Le concept est bien sûr emprunté à Michel de Certeau et à son ouvrage L'Invention du quotidien, 1980. MAIGRET E. (2000), « Les Trois héritages de Michel de Certeau. Un projet éclaté d'analyse de la modernité », Annales. Histoire, Sciences Sociales, 55^{ème} année, n°3, pp. 511-549.

entièrement nouvelles dédiées aux nouveaux supports numériques. On comprend pourquoi ce maintien des affordances anciennes permet le développement plus rapide de l'usage des nouveaux supports. Enfin, et cela nous intéresse tout particulièrement, la troisième caractéristique est la *participation*. L'ensemble des dispositifs numériques nécessitent un engagement actif pour la production de contenus, pour la mise en relation et la création de valeur (pas forcément marchande), qui naît de l'accroissement du nombre de personnes actives dans un réseau. Cette activité participative, qui contribue à construire l'environnement sociotechnique, emporte de nombreuses conséquences politiques⁽⁷⁾, notamment lorsqu'elle entre en résonance avec des formes de critiques radicales, en particulier dans le champ environnemental.

En effet, la transition écologique doit composer avec ces dimensions de la culture numérique qui lui parviennent tant *via* les dispositifs techniques que *via* les pratiques sociales. La critique sociale du modèle centralisateur de production de l'énergie et la customisation consécutive de sa consommation s'inscrivent très nettement dans cette volonté de réappropriation et d'autonomisation des individus vis-à-vis de monopoles institués. En témoigne l'émergence des plateformes de financement participatif, dont on voit qu'elles s'adressent à tous types de projets, du plus individuel au plus social. Faut-il revenir sur l'exemple des transports, qui subissent depuis presque une décennie une disruption au moins aussi brutale que celle que connurent les industries culturelles à la fin des années 1990 ? Les trois logiques de bricolage, de remédiation et de participation s'expriment dans l'invention des nouvelles formes de transports partagés, qui tendent à inventer un nouveau modèle d'autonomie « connectée » au sein d'un réseau social plus large.

À l'inverse, vouloir imposer de nouvelles pratiques écologiques en faisant fi de ce contexte, ce serait prendre le risque de rencontrer au mieux l'indifférence, et au pire l'ire collective. La question du traitement des déchets en est un bon exemple. La mise en place des procédures de tri sélectif s'est ainsi avérée d'une complexité incommensurable au regard de l'intensité de l'effort demandé aux citoyens. On peut poser l'hypothèse qu'une politique de tri s'appuyant sur des pratiques locales (bricolage), organisées tout d'abord entre professionnels ou entre particuliers (participation) sur une aire limitée, puis s'étendant progressivement en ayant recours tant aux bennes traditionnelles qu'à d'autres types de ramassage, avant de développer une vraie filière (remédiation), aurait sans doute permis d'avancer plus vite. Et d'éviter que de grands centres urbains n'aient à ce jour toujours pas de tri sélectif.

On peut bien sûr s'interroger sur les limites de certaines des valeurs portées par le numérique, notamment l'individualisation des pratiques, l'ubiquité, la gratuité, la virtualité, l'immédiateté, etc., et sur leur compatibilité avec les exigences propres à la transition écologique. C'est notamment ce qu'interroge le concept de *Gaïa* porté par Bruno Latour (mais celui-ci dépasse de très loin le cadre de cet avant-propos...).

À quoi doivent s'attacher les acteurs du numérique s'ils veulent s'inscrire dans la transition écologique ?

La révolution numérique est, à maints égards, incompatible avec la transition écologique. Les logiques économiques sous-jacentes au développement de l'ensemble du secteur « IT » peuvent d'ailleurs faire craindre que l'on ne jette un voile pudique sur l'empreinte environnementale du secteur.

D'une part, on sait que d'énormes quantités d'énergie sont nécessaires pour fabriquer, alimenter les appareils et traiter les données que les réseaux à haut-débit nous permettent de faire circuler en nombre toujours plus élevé. Selon un rapport de Greenpeace publié en janvier 2017, le secteur informatique représente environ 7 % de la consommation mondiale d'électricité. En France, chaque salarié consomme 50 % de la consommation électrique annuelle d'un particulier français, soit l'équivalent de 80 ampoules basse-consommation pendant 2 000 heures⁽⁸⁾. La consommation d'électricité du secteur numérique ne cesse de croître, pour atteindre des niveaux comparables à celle de certains des plus grands pays du monde. Il faudra davantage que l'engagement de grandes entreprises, comme Apple, à alimenter leurs usines à 100 % en énergies renouvelables pour être en mesure de relever le défi que suppose la croissance de notre boulimie énergétique. Autrement dit, une mobilisation importante de l'ensemble des acteurs du numérique est cruciale pour permettre de relever les défis du changement climatique. Nos choix en matière d'alimentation des infrastructures numériques conditionnent notre aptitude à respecter les engagements que nous avons pris en adoptant l'Accord de Paris sur le climat.

D'autre part, bien au-delà de ces enjeux énergétiques, l'empreinte environnementale du secteur est particulièrement prégnante sur certains types de ressource (métaux, eau) et conduit à de multiples pollutions du fait de l'absence de filières organisées de traitement des déchets et de recyclage. L'explosion des infrastructures numériques s'est en effet traduit par un doublement de la production d'aluminium depuis le début des années 2000, alors que l'extraction des métaux rares nécessaires à la production informatique, aux batteries, aux écrans, aux LEDs, etc. augmente de façon exponentielle⁽⁹⁾. Si, dans les années 1980, une dizaine de métaux étaient nécessaires à la fabrication d'un ordinateur, aujourd'hui

(7) MONNOYER-SMITH L. (2011), « La Participation en ligne, révélateur d'une évolution des pratiques politiques ? », *Participations*, vol. 1, n°1, pp. 156-185.

(8) <http://club.greenit.fr/doc/2017-03-ClubGreenIT-Benchmark-synthese.pdf>

(9) Voir la présentation d'Olivier Vidal, CNRS Grenoble, « Ressources minérales pour les TIC : besoins, modélisation de la production et des réserves », http://ecoinfo.cnrs.fr/IMG/mp4/ecoinfo-3-olivier_vidal___questions.mp4

nous ne sommes pas loin de couvrir la totalité du tableau périodique, avec une cinquantaine d'éléments. Or, nombre de ces éléments sont jugés critiques, comme l'argent, le cobalt, le cuivre, l'indium, le gallium, le germanium, le lithium, le tantale, et autres terres rares. En effet, les réserves sont parfois très faibles (pour l'indium, par exemple), les métaux sont pour l'heure très peu recyclés, et il n'existe quasiment pas, à l'heure actuelle, de possibilité de substitution. Le coût de production de certains d'entre eux augmente de manière importante au fur et à mesure que les réserves diminuent, ce qui accroît d'autant la quantité d'énergie nécessaire à leur production. La concurrence, enfin, est assez forte entre le secteur IT et le secteur des énergies renouvelables, qui sont, elles aussi, fortement consommatrices de terres rares (indium, gallium, sélénium et tellure), avec une augmentation de la demande allant de 5 à 10 % par an pour répondre aux engagements de notre stratégie nationale bas carbone.

Enfin, le modèle économique du secteur numérique reste profondément linéaire, basé sur l'obsolescence technique des matériels sans qu'un travail approfondi sur le cycle de vie des produits n'ait été réalisé. La durée de vie des ordinateurs a ainsi été divisée par 3 en 30 ans et il faut 100 fois plus d'octets pour faire tourner Windows Office aujourd'hui qu'il y a 20 ans, cela sans compter la multiplication des versions des téléphones portables (6 versions *iPhone* en 5 ans). On sait que ce modèle n'est pas tenable, qu'il s'inscrit dans une dynamique de consommation excessivement productrice de déchets, dont une partie significative s'évapore dans des filières informelles, notamment en Afrique⁽¹⁰⁾, et qu'il repose pour l'essentiel sur un *marketing* de la nouveauté.

La transition numérique a pour l'heure fait l'impasse sur une réflexion approfondie sur les conditions de sa possible existence, à quelques exceptions près. Il y a quelque chose de surprenant dans cette industrie qui « disrupte » nombre de pratiques et de modèles, tout en s'inscrivant en profondeur dans une culture productiviste et prédatrice de l'environnement typique du siècle passé.

Vers une création de communs

Pour que les transitions numérique et écologique parviennent à s'articuler entre elles de manière harmonieuse et que la première ne sacrifie pas la seconde sur l'autel d'une rentabilité de courte vue, il faut concevoir une nouvelle catégorie de biens, les *commons*. Issus notamment des travaux de l'économiste américaine Elinor Ostrom, ce concept fait aujourd'hui l'objet de multiples recherches et propositions d'une communauté scientifique préoccupée par les modèles économiques et sociaux de la transition écologique⁽¹¹⁾. Il caractérise ces biens comme étant d'accès universel, mais susceptibles de devenir exclusifs, et dont la disparition ou l'appropriation menacerait directement ou indirectement certaines communautés humaines en mettant en danger les écosystèmes qui leur permettent de vivre. Il en va ainsi de la plupart des ressources naturelles, de la faune halieutique de nos océans ou des pollinisateurs. Mais il en va aussi de certaines ressources informatiques, comme les logiciels libres ou la connaissance.

Organiser une gouvernance de la ressource en ayant recours au concept de bien commun offre une voie (qui reste à approfondir) permettant de mieux articuler entre elle les transitions numérique et écologique. Il s'agirait à la fois de placer en tête de la hiérarchie des valeurs un élément essentiel de la transition écologique, à savoir la préservation des écosystèmes et des ressources, tout en incitant les acteurs du numérique à changer de paradigme pour se penser comme des acteurs à part entière de la transition écologique.

C'est ce que dessinent – encore timidement –, par exemple, l'Accord de Paris, la COP de Carthagène sur la biodiversité et les Objectifs du développement durable adoptés par l'ONU en 2015. Ces mutations nécessitent une prise de conscience urgente des défis communs à relever, mais elles peuvent aussi constituer ce projet de société auquel de nombreuses populations aspirent aujourd'hui.

(10) Voir le rapport du PNUE sur l'état de l'application de la Convention de Bâle, programme e-waste, 2012. <http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW-EWASTE-PUB-WeeAfricaReport.French.pdf>

(11) Voir, par exemple, GIRAUD G., Illusion financière. Des subprimes à la transition écologique, Les Éditions de l'Atelier, 2014.

Introduction

Par Hélène SERVEILLE
et Richard LAVERGNE

Ingénieurs généraux des Mines – Conseil général de l'Économie

Le présent numéro de *Responsabilité & Environnement*, consacré à la transition numérique et à la transition écologique, trouve son origine dans les interrogations suscitées par chacune de ces deux « transitions », ainsi que dans le fait qu'elles impliquent, par elles-mêmes et par leurs interactions, des enjeux sociétaux, environnementaux, socioéconomiques, techniques... potentiellement considérables. Il convient donc d'y préparer l'économie et la société françaises en prenant la mesure des opportunités et des risques qu'elles sous-tendent.

Le choix éditorial qui a présidé à la mise au point de ce numéro des *Annales des Mines* distingue trois parties :

- Le numérique et l'écologie : deux domaines en transition ;
- Le numérique, outil et accélérateur de la transition énergétique ? ;
- Au-delà de l'énergie : le numérique et l'environnement.

Les domaines de l'environnement, de l'énergie, du numérique, du *Big Data* et des télécommunications font l'objet de transformations importantes et rapides, dont les convergences suscitent tout à la fois l'enthousiasme, des interrogations et des inquiétudes. Cela est particulièrement le cas dans le domaine de l'électricité, dont la part est croissante dans les mix énergétiques des pays mettant en œuvre une transition énergétique. La conjonction de l'ouverture des marchés, de la forte baisse du coût de l'éolien et du photovoltaïque et du développement rapide des technologies de contrôle-commande, de l'information et du numérique a suscité une nouvelle génération de fournisseurs et d'activités connexes (agrégation, effacement...). Pour les autres formes d'énergie, et dans les services liés à l'environnement, le numérique est tout autant une source potentielle de changements, avec l'émergence de nouveaux acteurs et de nouvelles perspectives.

L'un des auteurs contribuant à ce numéro de *Responsabilité & environnement*, Daniel Kaplan, a ainsi pu écrire, en juin 2015, que : « *la transition écologique sait raconter son but, mais peine à dessiner son chemin. La transition numérique, c'est le contraire. Chacune a besoin de l'autre ! Et pourtant, leurs acteurs évoluent trop souvent dans des sphères isolées, sans réaliser la puissance transformatrice qu'aurait leur convergence* ».

La transition écologique

Selon le Commissariat général au Développement durable (CGDD), que dirige Laurence Monnoyer-Smith, il s'agit de « *mettre en mouvement coordonné l'ensemble des acteurs de la société et secteurs de l'économie, au-delà*

des premières mesures sectorielles déjà engagées (énergie, agriculture...) et des initiatives pionnières, sur quatre enjeux écologiques majeurs : le changement climatique, la perte accélérée de biodiversité, la raréfaction des ressources et la multiplication des risques sanitaires ».

La transition écologique vise à « *renouveler nos façons de consommer, de produire, de travailler, de vivre ensemble pour répondre à ces grands enjeux* », en utilisant notamment des leviers transversaux tels que la prévention et la réduction des inégalités, l'orientation des instruments économiques et financiers et le recours à l'éducation et à la formation. Les dimensions sociales et économiques du développement durable sont parties intégrantes des solutions proposées, même si les enjeux prioritaires sont d'abord des problématiques écologiques. Concrètement, le gouvernement a publié, en février 2015, une *Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable* (SNTEDD 2015-2020⁽¹⁾). Un des volets importants de cette stratégie porte évidemment sur la transition énergétique, laquelle, peu de temps après, a fait l'objet de la loi n°2015-992 du 17 août 2015, dite « TECV », relative à la Transition énergétique pour la croissance verte.

L'industrie de l'énergie connaît de graves difficultés en Europe, en particulier l'électricité (volatilité des cours des matières premières, faiblesse des prix des quotas de CO₂, prix négatifs...). Les entreprises de ce secteur ont été affectées par une série de crises et de transformations depuis le début des années 2000 (ouverture des marchés à la concurrence, arrivée de nouveaux acteurs, transition énergétique, etc.). Le Paquet⁽²⁾ que la Commission européenne a publié le 30 novembre 2016 intitulé « *Une énergie propre pour tous les Européens* » vise à remédier à cette situation en s'ajoutant à d'autres initiatives phares, telles que le « *marché unique numérique* » ou le « *plan d'investissement pour l'Europe* » visant à améliorer l'emploi, la croissance et l'investissement en Europe.

La transition numérique

Depuis environ vingt ans, avec l'arrivée d'Internet, le numérique transforme notre vie quotidienne et nos modes d'accès à l'information. Peu à peu, il bouscule les positions acquises dans plusieurs secteurs économiques,

(1) Téléchargeable aux adresses : www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/SNTEDD%20-%20En%20bref.pdf (résumé) et www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/SNTEDD%20-%20La%20strat%C3%A9gie.pdf (rapport).

(2) <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2016/FR/COM-2016-860-F1-FR-MAIN.pdf> (communication).

comme la distribution, les loisirs, les transports ou le tourisme. Ainsi, par exemple, en moins de dix ans d'existence, Airbnb a atteint un chiffre d'affaires d'un milliard de dollars, avec seulement 500 employés, alors qu'une grande chaîne hôtelière internationale classique comme Hilton emploie 130 000 personnes, pour un chiffre d'affaires de 9 milliards de dollars (soit une intensité en emplois 280 fois plus forte qu'Airbnb). Les valeurs boursières connaissent elles aussi des disproportions considérables. Plus précisément, la transition – ou révolution – numérique entraînera, selon France Stratégie⁽³⁾, des « transformations en profondeur de nos organisations économiques et sociales (...), avec des structures de production plus fluides et éclatées :

- la capacité à traiter une masse croissante d'informations va permettre une personnalisation accrue des offres de biens et services, même dans l'industrie ;
- le travail collaboratif, en dehors du cadre classique de production, est amené à se développer ;
- la technologie numérique jouera un rôle important dans la transition écologique, notamment en accompagnant l'économie collaborative ou l'économie circulaire ».

Les interactions entre les transitions numérique et écologique

S'agissant de l'environnement, le numérique apporte d'ores et déjà de nombreuses améliorations à sa protection, ne serait-ce que grâce à une connaissance de plus en plus fine des phénomènes en cause (données, observation, météorologie, modélisation...). D'autres développements sont attendus, notamment grâce à une recherche environnementale renouvelée et à des évolutions sociétales qui les soutiennent. La mise au point de nouvelles applications et de nouvelles techniques représente des opportunités considérables en termes d'emplois et de création de valeur.

À court ou moyen terme, le numérique va faciliter la transition énergétique en améliorant l'efficacité des installations, des équipements (tant au niveau de la consommation que de la production) et des systèmes. Son essor permet notamment de transformer la **relation entre clients et fournisseurs d'énergie** et il intervient opportunément pour soutenir le **développement de l'éolien et du photovoltaïque** de façon à mieux les intégrer aux réseaux électriques et faire face à l'intermittence de ces énergies renouvelables. Pour les transports, le numérique est déterminant, par exemple, dans la gestion des bornes de recharge ou des batteries des **véhicules électriques**. Dans tous les secteurs, il permet de proposer de nouveaux services ou concepts (par exemple, des compteurs communicants/intelligents) dans la relation entre clients et fournisseurs d'énergie : *smart grids*, *smart cities*, *open data*, gestion dynamique de la demande d'énergie, nouveaux modèles d'affaires, intelligence artificielle, robotisation et objets connectés, etc. À plus long terme, certains imaginent une vision « Internet » de l'énergie, où le rôle des réseaux serait radicalement transformé grâce aux *blockchains*, au *crowdfunding*, aux « boucles locales », etc. Les initiatives en matière d'énergie répartie ne concernent pour l'instant qu'un segment

limité de citoyens motivés, et il faudra sans doute attendre une dizaine d'années pour savoir si elles se généraliseront, ou non.

Lors de la dernière convention de la SFEN (Société française de l'Énergie nucléaire), son vice-président, Xavier Ursat, a indiqué que « la transformation numérique est un des leviers fondamentaux pour gagner en compétitivité et assurer une meilleure coopération au sein de l'industrie française, dont le nucléaire qui constitue la troisième filière industrielle nationale derrière l'aéronautique et l'automobile, avec 2 500 entreprises et 220 000 salariés ». À titre d'exemple, il a cité un outil « conçu en [un] temps record, en 2016, qui va nous permettre de digitaliser tous les essais d'ensemble du réacteur EPR de Flamanville ».

Une des tendances clés de la transition énergétique en France, issue du Débat national sur la transition énergétique de 2013, puis confirmée par la loi TECV et stimulée par les promesses du numérique, est la **décentralisation de la politique énergétique** au profit des territoires, voire de communautés. L'échange de biens au service de l'économie circulaire, l'économie collaborative (notamment le covoiturage et l'auto-partage entre particuliers), le *crowdsourcing* urbain (pour produire des données utiles à la ville) sont quelques exemples dans lesquels le numérique apporte une plus-value à la résolution d'enjeux territoriaux au profit des transitions écologique et énergétique. Mais jusqu'où peut-on aller en ce sens sans mettre en péril la sécurité d'approvisionnement énergétique, ni coûter trop cher à la collectivité ?

Des risques et des opportunités

La promotion de la transition numérique peut apparaître comme schizophrénique, dans les domaines de l'énergie et de l'environnement. Elle est un facteur de croissance du PIB qui, au niveau mondial, tend à augmenter les émissions de CO₂ et, donc, à contrarier la transition énergétique. Comme l'expliquent deux des auteurs de ce numéro de *Responsabilité & Environnement*, Morgane Créach et Fabrice Flipo, les « objets numériques » sont voraces en énergie et en matières premières. Mais le numérique est aussi un moyen de disruption, en lien avec la productivité des ressources, la décentralisation des actions, l'économie circulaire, etc., qui vise à réduire la demande d'énergie et de ressources naturelles, tout en réduisant les émissions de CO₂, et ce, sans perte de bien-être. La « croissance verte », qui se définit comme « un mode de développement économique respectueux de l'environnement, à la fois sobre et efficace en énergie et en consommation de ressources et de carbone, socialement inclusif, soutenant le potentiel d'innovation et garant de la compétitivité des entreprises » (loi TECV, art. 1^{er}), est une façon d'essayer de dépasser cette contradiction.

Dans les domaines de l'énergie et de l'environnement, comme dans les autres secteurs d'activité économique,

(3) www.strategie.gouv.fr/presse/communiqués-de-presse/tirer-parti-de-revolution-numerique-20172027

le numérique suscite des risques et des craintes : cybercriminalité/terrorisme, menaces sur la confidentialité des données, pertes d'emplois, remise en cause du service public et des tarifs sociaux ou réglementés, remise en cause d'équilibres socioéconomiques établis de longue date, etc. Mais le numérique ouvre aussi des perspectives de relance économique et de création d'emplois grâce à des gains de compétitivité et d'agilité. Les pouvoirs publics, tant au niveau national qu'européen, s'efforcent de valoriser ces opportunités, en particulier dans l'industrie. Ainsi, la Commission européenne a adopté, en avril 2016, l'initiative *Digitising European Industry* (DEI), qui s'appuie sur des programmes nationaux, notamment les programmes Industrie du Futur (France), Industrie 4.0 (Allemagne, Autriche), *Smart Industry* (Pays-Bas, Suède), *Industria Conectada 4.0* (Espagne) et *Industria 4.0* (Italie).

Des acteurs engagés dans les deux transitions

Un des enjeux paraissant majeurs de la compétitivité économique et du développement d'une offre française adaptée au numérique réside dans le partage de la valeur autour de l'accès, du partage et de l'ouverture des données entre opérateurs industriels. Cela requiert d'investir pour développer, acquérir et entretenir des compétences, des services technologiques et de l'expertise, ainsi qu'une po-

litique industrielle européenne et nationale pour soutenir le mouvement. Dans cette optique, comme le soulignent dans leurs articles, notamment Laurent Michel, Sylvain Moreau et Michel Derdevet en ce qui concerne l'énergie, le cadre juridique a fortement évolué autour des concepts de « *Big Data* » et de « *service public de la donnée* ».

Les *start-ups* impliquées, qui se situent à la frontière de l'écologie et du numérique, sont nombreuses. Les grands énergéticiens, comme les pouvoirs publics (voir l'initiative « *GreenTech Verte* » du ministère chargé de l'Environnement), ont compris l'intérêt qu'elles représentent. Dans le même ordre d'idée, la Fintech (finance numérique) peut être utilisée pour dégager des avantages environnementaux ou financer le développement des énergies renouvelables.

C'est donc bien pour l'ensemble des domaines de l'écologie et de l'énergie que le numérique (sans en négliger les risques) représente une opportunité de « *croissance verte* », à la fois en préservant l'environnement, en améliorant la gestion des ressources et en permettant la relance d'activités économiques en difficulté.

La lecture du présent numéro de *Responsabilité & Environnement* permettra à chacun d'apprécier l'ampleur des changements potentiels issus des deux transitions en cours.

1365 LE CLOS DES LAMBRAYS 1593 CHÂTEAU D'YQUEM 1668 DOM PÉRIGNON 1729 RUINART
1743 MOËT & CHANDON 1765 HENNESSY 1772 VEUVE CLICQUOT 1780 CHAUMET 1815 ARDBÈG
1817 COVA 1828 GUERLAIN 1832 CHÂTEAU CHEVAL BLANC 1843 KRUG 1843 GLENMORANGIE
1846 LOEWE 1849 MOYNAT 1849 ROYAL VAN LENT 1852 LE BON MARCHÉ 1854 LOUIS VUITTON
1858 MERCIER 1860 TAG HEUER 1860 JARDIN D'ACCLIMATATION 1865 ZENITH
1870 LA SAMARITAINE 1884 BVLGARI 1895 BERLUTI 1898 RIMOWA 1908 LES ECHOS
1916 ACQUA DI PARMA 1924 LORO PIANA 1925 FENDI 1936 FRED 1944 LE PARISIEN
1945 CÉLINE 1947 DIOR 1947 EMILIO PUCCI 1952 GIVENCHY 1958 STARBOARD CRUISE SERVICES
1959 CHANDON 1960 DFS 1969 SEPHORA 1970 KENZO 1970 CAPE MENTELLE
1976 BENEFIT COSMETICS 1977 NEWTON VINEYARD 1980 HUBLOT 1984 MAKE UP FOR EVER
1984 THOMAS PINK 1984 MARC JACOBS 1985 CLOUDY BAY 1991 FRESH 1993 BELVEDERE
1998 BODEGA NUMANTHIA 1999 CHEVAL DES ANDES 1999 TERRAZAS DE LOS ANDES
2004 NICHOLAS KIRKWOOD 2005 EDUN 2006 HÔTELS CHEVAL BLANC
2009 MAISON FRANCIS KURKDJIAN 2010 NOWNESS 2013 AO YUN

LVMH

LE FUTUR DE LA TRADITION

#MAKEACHILDCRY

Vestas. Leader de l'éolien en France et dans le monde.

Pionnier sur le marché mondial de l'énergie éolienne depuis 1979, Vestas est aujourd'hui le leader mondial du marché avec 83 GW installés dans le monde, dans 75 pays.

En outre, Vestas France est pionnier du marché français depuis 1991. En décembre 2016, Vestas France avait installé plus de 3 GW, se positionnant en tant que leader du marché avec 26% des installations totales en France.

Wind. It means the world to us.[™]

Faire converger les transitions numérique et écologique

Par Damien DEMAILLY

Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI)

Renaud FRANCOU

Fondation Internet Nouvelle génération (Fing)

Daniel KAPLAN

Fondation Internet Nouvelle génération (Fing)

et Mathieu SAUJOT

Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI)

La transition écologique est un horizon incontournable pour nos sociétés, la transition numérique est, quand à elle, la grande force transformatrice de notre époque. La première sait raconter son but, mais peine à dessiner son chemin ; la seconde est notre quotidien, une force permanente de changement, mais qui ne poursuit pas d'objectif collectif particulier. L'une a le but à atteindre, l'autre le chemin à emprunter : chacune de ces deux transitions a besoin de l'autre ! Et pourtant, leurs acteurs évoluent trop souvent dans des sphères séparées, sans réaliser pleinement la puissance transformatrice qu'aurait leur convergence.

Comment dès lors faire converger ces deux grandes transitions contemporaines ?

Qu'est-ce que le numérique ?

Commençons tout d'abord par clarifier ce que nous entendons par le terme « numérique ».

Dans les entreprises comme dans l'action publique, les acteurs de l'écologie et ceux du numérique sont confrontés à une même difficulté : les transformations dont ils sont porteurs sont transversales. Elles touchent tous les métiers et toutes les dimensions des organisations. Elles relèvent à la fois de la technique, des pratiques quotidiennes et des formes d'action collective. Dès qu'on les spécialise, on les stérilise.

Ainsi l'apport du numérique à la transition écologique est-il trop souvent considéré sous le seul angle technique, celui du « *smart* », de l'optimisation des processus pour augmenter la productivité des ressources (avec, par exemple, l'utilisation de capteurs pour améliorer le pilotage de réseaux d'eau ou d'éclairage public...).

Or, si le numérique prend aujourd'hui une telle place, c'est parce qu'il est aussi beaucoup d'autres choses. En effet, le numérique, c'est aussi :

- une manière de produire et de partager des connaissances : les « *Data* » deviennent le support dominant de la production d'informations et de décisions. Ainsi, le « défi » onusien *Data 4 Climate Action* ⁽¹⁾ exploite de grands volumes de données produites par des acteurs privés pour

« catalyser l'action contre le changement climatique » ;

- de nouvelles pratiques individuelles et sociales (SMS, réseaux sociaux, partage de fichiers ou de plans...). Sous leur apparence parfois futile, ces usages peuvent aussi marquer le point de départ de mobilisations, de coordinations, de partages et d'échanges plus massifs : on pense notamment à la vitesse avec laquelle les réseaux sociaux se sont invités dans les campagnes électorales et au rôle important qu'ils y ont joué, ou encore à l'importance prise par des plateformes de vente en ligne telles que Le Bon Coin ;

- de nouvelles formes de coordination et d'action collective allant de l'échelle locale à la plus globale : il en est ainsi de Wikipedia qui permet de construire de la connaissance et de la partager entre des millions de personnes, des plateformes de l'économie collaborative qui permettent d'échanger (ou de partager) son véhicule, son logement, son potager..., ou encore, du *crowdfunding* en matière de financement de projets de toutes sortes.

Pris dans toute sa diversité, et donc allant bien au-delà des seules solutions passant par l'informatique et les calculs auxquels on le réduit encore trop souvent, le numérique nous invite à explorer d'une tout autre façon

(1) www.dataforclimateaction.org

TRANSITIONS²

ecology by design

METTRE L'INFORMATIQUE AU SERVICE DE LA TRANSFORMATION
ÉCOLOGIQUE DES ORGANISATIONS



© D.R.

Document du projet *Ecology by design* s'inscrivant dans le cadre du programme Transitions².

« Le monde du numérique doit mieux intégrer l'enjeu écologique à la fois dans la conception de ses services et dans sa contribution à la société, c'est ce que nous avons développé dans le projet *Ecology by design*. »

les chemins de la transition écologique en investissant les dimensions sociales et collectives de cette transformation.

Comment ce numérique, dans toutes ses dimensions, peut-il se mettre au service de manières plus durables de produire, de consommer des objets et des services ou de se déplacer ? Et, comment, sur cette base, des politiques et des stratégies de transitions écologique et énergétique peuvent-elles intégrer une « perspective numérique » ?

Il y a là pour l'écologie à la fois une nécessité et une

source d'opportunités à explorer, qui nous paraissent aussi complexes qu'excitantes. Mais cela nécessite, en tout premier lieu, de clarifier les liens existants entre ces deux transitions.

Reconnaitre aussi bien les risques que les opportunités du numérique pour le développement durable

La communauté écologique, construite en partie sur une critique de la technologie et de la croissance, se méfie des promesses d'innovations techniques. Elle a tendance à se

focaliser sur les déchets générés par la production d'objets, sur la consommation énergétique et sur les risques d'effets rebond (c'est par exemple le cas de l'amélioration des technologies automobiles qui a été aussitôt réinvestie dans davantage de puissance et de confort). Elle n'a pas tort, car, dans le système actuel, l'empreinte écologique liée à la fabrication et à l'utilisation du matériel numérique *via* Internet est colossale⁽²⁾. Et la dynamique actuelle de son développement intensifie ces impacts : ainsi, la demande croissante de puissance de calcul rend les équipements très vite obsolètes, alors même que l'on sait que leur fabrication concentre une bonne part des impacts environnementaux du numérique. Les évolutions vers un *Cloud* généralisé et les objets connectés pourraient démultiplier la consommation énergétique liée à la gestion des données et à leur utilisation (serveurs...). Cela milite sans conteste en faveur d'une nouvelle approche : le monde du numérique doit mieux intégrer l'enjeu écologique à la fois dans la conception de ses services et dans sa contribution à la société, c'est ce que nous avons développé dans le projet *Ecology by design*⁽³⁾.

Par ailleurs, le numérique, même lorsqu'il prend, par exemple, la forme de plateformes collaboratives d'échange de biens, ne permet pas à lui seul de changer nos « logiciels » de consommation, et donc de réduire notre consommation de ressources, comme l'a démontré le projet PICO⁽⁴⁾ (la revente sur Internet permet, par exemple, à certains usagers d'augmenter la fréquence de leurs achats d'objets neufs). Le numérique est aujourd'hui le support technique privilégié de nos modes de vie, que nous savons trop dispendieux pour l'équilibre de notre planète. Et, dans notre système actuel, le risque demeure que les gains d'efficacité apportés par le numérique soient réinvestis dans toujours plus de consommation et de croissance matérielle, un phénomène que nous constatons depuis des décennies.

Mais la communauté écologique doit élargir son regard sur le numérique, car celui-ci est aussi porteur de promesses. En effet, il outille autant la mesure et la compréhension des phénomènes climatiques ou des pollutions quotidiennes par l'intermédiaire d'applications individuelles, que la montée en puissance de formes partagées de mobilité ou de consommation ; les « sciences citoyennes », comme le recensement collaboratif de la biodiversité, que les projets *open source* et *low tech* en matière d'énergie ou d'agriculture ; les mobilisations massives (telles que 350.org) que l'organisation complexe des flux de l'économie circulaire. Nos actions en faveur de l'écologie ont beaucoup à gagner à s'appuyer sur le numérique en matière d'information, d'implication des citoyens et des parties prenantes, de collaboration, d'organisation, de passage à l'échelle...

De leur côté, les acteurs du numérique ont une perception d'eux-mêmes marquée par l'immatérialité et l'efficacité, et se considèrent écologiques, par nature. Portés par une dynamique d'innovation permanente allant dans toutes les directions, ils voient d'abord les opportunités et bien plus tard les risques. On n'innove pas sans un brin d'optimisme. Certains de ces acteurs nourrissent progressivement leur soif d'innovation par les défis écologiques qui

nous font face. Nombreux sont les innovateurs qui s'attaquent aujourd'hui aux défis écologiques en s'appuyant sur la dématérialisation, sur le partage, la réduction des déchets et les changements de comportement (pensons aux *CivicTech*) ou en cherchant à « disrupter » divers marchés (ceux de l'énergie, de la mobilité ou de la production et de la distribution des objets). Néanmoins, aussi puissante que soit leur idée, ils ne sont généralement pas outillés pour mesurer la réduction des impacts qu'ils promettent en toute bonne foi⁽⁵⁾. Or, dans un système d'innovation encore entièrement focalisé sur le potentiel de croissance et de rentabilité des entreprises, si l'impact écologique n'est considéré que comme une externalité positive, sa réduction ne résistera pas aux premières difficultés, ni aux premières évolutions stratégiques.

Même si le rapprochement entre numérique et écologie reste fragile, des connaissances et des méthodes structurantes émergent dans plusieurs domaines. Ainsi le « *green IT* » s'appuie-t-il sur des méthodes assez solides pour réduire l'empreinte écologique de l'informatique des grandes entreprises. Plusieurs études ont démontré le potentiel du covoiturage et de l'autopartage⁽⁶⁾ sur de courtes distances, ainsi que celui des systèmes « multimodaux » intégrant les modes actifs de mobilité pour rendre celle-ci plus « durable ». Le projet « Agir Local »⁽⁷⁾ montre comment, dans les collectivités locales, les personnes en charge des sujets écologiques et numériques peuvent utilement travailler ensemble. En matière d'innovation, le projet « Innovation Facteur 4 » démontre comment des outils existants peuvent aider innovateurs et investisseurs à placer sérieusement l'impact écologique au cœur de leur projet. Et nous avons observé qu'en permettant la participation et la mobilisation des citoyens localement, par l'intermédiaire de plateformes de budget participatif comme à Paris⁽⁸⁾, ou au travers de plateformes de *crowdsourcing*⁽⁹⁾ urbain ou de financement participatif, le numérique peut soutenir cette activité citoyenne si essentielle pour arriver à mettre en œuvre une transformation écologique qui nous engage tous.

(2) Voir à ce sujet les travaux du G.D.S EcoInfo du CNRS : <http://ecoinfo.cnrs.fr>

(3) <http://www.transitions2.net/catalogue/view/1104/cahier-dexploration-ecology-by-design-by-transitions%C2%B2>

(4) http://www.iddri.org/Themes/01-PicoPaper_ISSUE-BRIEF_13juillet.pdf

(5) Comme nous l'observons dans le cadre du projet « Innovation Facteur 4 » qui s'inscrit dans le cadre du programme *Transitions 2* : <http://www.transitions2.net/catalogue/view/1134/a-la-recherche-de-linnovation-facteur-4>

(6) <http://www.iddri.org/Publications/Mobilite-collaborative-des-promesses-aux-enjeux-pour-les-pouvoirs-publics?fr>

(7) <http://www.transitions2.net/catalogue/view/1020/kit-agirlocal>

(8) <http://citiscopes.org/commentary/2017/04/yes-govtech-can-change-way-cities-function>

(9) http://www.iddri.org/Publications/Collections/Syntheses/PB0916_TF%20MS_crowdsourcing%20cas%20d%C3%A9tude.docx.pdf

De nouvelles politiques publiques pour réaliser la convergence entre transition écologique et transition numérique

Si de nombreuses questions subsistent, nous en savons déjà suffisamment pour commencer à agir et à faire converger ces deux transitions.

Pour que les innovateurs du numérique se tournent massivement vers la transition écologique, il faut une intention ferme qui soit inscrite au cœur du modèle d'affaires des acteurs et qui s'appuie sur un « système d'innovation » qui mesure le succès à l'aune d'autres indicateurs que les seuls indicateurs financiers. Comment ? En modifiant, tout d'abord, les outils de sélection et de soutien mis en œuvre tant par les acteurs publics que par les acteurs privés⁽¹⁰⁾, et, également, en faisant évoluer nos outils de mesure de la valeur et des impacts. L'objectif est double : concevoir des solutions numériques qui n'alimentent pas une dynamique d'obsolescence et de hausse des consommations énergétiques et orienter les finalités des projets innovants vers la transition écologique. L'État, en initiant les incubateurs de la *GreenTech*⁽¹¹⁾, semble avoir compris la nécessité d'un tel effort.

Mais centrés comme ils le sont sur leur outil et leurs propositions de valeur, les innovateurs n'ont pas forcément la visibilité ni la « main » sur les interactions complexes que vont créer leurs « solutions », ou dont elles vont dépendre. Au-delà de la question des effets rebond, une innovation ne produira pas les résultats escomptés en l'absence d'un système lui permettant de s'épanouir : par exemple, une application de covoiturage sur courtes distances ne peut produire de grands résultats, si elle ne s'inscrit pas dans un système de mobilité organisé à l'échelle du territoire. Leurs solutions n'apporteront des gains que si elles s'inscrivent dans un système adapté, dans un cadre vertueux. À différents niveaux, ce doit être le rôle des pouvoirs publics que d'agir sur ces cadres.

Les collectivités locales ont certainement un rôle clé à jouer pour soutenir et intégrer les innovations du numérique les plus profitables au développement durable de leur territoire. Nos travaux montrent quelques directions en la matière. Elles doivent œuvrer progressivement à mieux connaître et à mieux appréhender ces nombreuses innovations, pour être à même d'identifier celles qui pourraient apporter des solutions complémentaires et utiles à ce que les collectivités mettent déjà en œuvre dans les différents secteurs urbains. Organiser la mutualisation entre acteurs publics et l'échange d'expériences est une nécessité si l'on veut pouvoir faire face efficacement au flux continu d'innovations qui déferle sur des collectivités locales à la recherche de soutien. Et la multiplication des échanges doit également permettre de surmonter des différences culturelles entre entrepreneurs et autorités publiques qui souvent compliquent leur travail commun.

Les collectivités doivent également savoir soutenir les expérimentations locales afin de les orienter vers des objectifs de développement durable et leur donner la possibilité de tester leurs innovations et de comprendre les enjeux d'une diffusion plus large de celles-ci. Cela est d'autant plus cri-

tique que, souvent, les solutions les plus alignées sur l'intérêt général sont celles qui ont le plus de mal à se développer seules. Derrière le mot valise d'expérimentation se jouent des changements plus profonds qui sont liés à la culture numérique : le principe d'itération, l'acceptation de l'échec pour mieux apprendre, l'ouverture et le partage de données pour mieux évaluer et comprendre les expériences... C'est, par exemple, une des ambitions d'Étalab que d'essayer d'inoculer au sein de l'État cet état d'esprit, sans lequel il ne saurait y avoir de réelle transformation par le numérique.

Les solutions du numérique et de l'économie collaborative représentent un réservoir d'innovations dans lequel les pouvoirs publics peuvent puiser pour renouveler leurs services publics⁽¹²⁾. Par exemple, la politique du recyclage devrait progressivement amener à tisser des liens avec les plateformes d'échange de biens. Collaborer avec ces nouveaux acteurs, notamment lorsque ce sont des plateformes, nécessite toutefois de nouvelles formes de gouvernance et de partenariat qui sont à inventer, ce qui soulève de nombreuses questions quant au nouveau contrat social urbain à élaborer⁽¹³⁾.

Enfin, les stratégies et les politiques de soutien à l'innovation numérique doivent devenir à la fois plus exigeantes et plus créatives. Plus exigeantes, en abordant la question de leur empreinte écologique et de leurs impacts potentiels, positifs comme négatifs. Plus créatives, en s'intéressant moins exclusivement à la performance technologique et économique et davantage à l'exploration de modèles alternatifs : l'*open source* comme vecteur de diffusion de solutions vertueuses ; le partage, la collaboration et les « communs » comme alternatives positives à la surconsommation ; le « pair à pair » et les systèmes d'échange alternatifs...

Un changement d'état d'esprit

Au-delà de ces principes, l'alliance féconde entre l'écologie et le numérique invite chacun à se transformer de l'intérieur. La « *tech* » doit s'inventer un agenda d'innovation qui prenne en compte la finitude du monde, et les « écologues » doivent se saisir de l'incroyable force de transformation du numérique. Depuis un an, le programme⁽¹⁴⁾ *Transitions 2* lancé par un certain nombre d'acteurs, dont la Fing et l'IDDRI, explore les changements apportés par l'alliance de l'écologie et du numérique, mais aussi la manière dont cette alliance nous change nous-mêmes. Mais nous n'en sommes qu'au tout début. Nous entendons aujourd'hui inviter d'autres acteurs issus de l'écologie et du numérique à nous rejoindre pour que nous réexaminions ensemble leurs priorités.

(10) *Ceux-ci font l'objet d'un double travail avec Bpifrance : la parution en 2015 (et désormais l'usage par les chargés d'affaires de Bpifrance) du référentiel « Innovation nouvelle génération » (<http://www.bpifrance.fr/A-la-une/Actualites/Innovation-Nouvelle-Generation-un-nouveau-regard-sur-l-innovation-9491>) et la réalisation (en cours) d'un travail, « Innovation Facteur 4 ».*

(11) <http://www.developpement-durable.gouv.fr/reseau-incubateurs-greentech-verte>

(12) http://www.lemonde.fr/idees/article/2016/06/23/utiliser-l-economie-collaborative-pour-enrichir-les-services-publics_4956561_3232.html#5C7rBBrshp4eAltU.99

(13) <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/0211947985234-pour-un-nouveau-contrat-social-urbain-2077737.php>

(14) www.transitions2.net

Comment transition numérique et transition écologique s'interconnectent-elles ?

Par Patrice GEOFFRON

Université Paris-Dauphine, Paris Sciences et Lettres Research University, Laboratoire d'économie de Dauphine (LEDA), EA 4404, UMR IRD 225

Les transitions numérique et écologique structurent les transformations socioéconomiques de ce demi-siècle au travers de relations complexes. D'un côté, la transition numérique n'est pas sans avoir une empreinte écologique directe (consommation énergétique, en particulier) et indirecte (pratiques sociales dont le numérique encourage le développement, comme le tourisme). Mais, de l'autre, la numérisation est une condition essentielle de la réalisation de la transition écologique, notamment pour répondre à la complexification du pilotage des systèmes énergétiques. Le développement de projets de *smart cities* laisse entrevoir le large potentiel d'innovations qui se situe à la convergence de ces deux transitions, ainsi que des disruptions organisationnelles. Dans cette perspective, les mécanismes de type « *blockchain* » favoriseront des transactions pair-à-pair propices à la décentralisation énergétique et à l'émergence de « monnaies-carbone » ou de « monnaies-énergie ».

Deux transformations distinctes s'inscrivant dans l'ordre des changements technologiques

Analyser les relations entre « transition numérique » et « transition écologique » procède d'une démarche logique tant ces deux processus contemporains (par un concours de circonstances historiques, certes) sont appelés à structurer les évolutions socioéconomiques de ce demi-siècle.

Avant d'apprécier les interdépendances potentielles, il importe de souligner à quel point ces deux transitions diffèrent intrinsèquement l'une de l'autre, tant chacune entretient un rapport spécifique à la technologie.

La transition numérique correspond à une transformation induite initialement par les progrès combinés de l'électronique et de l'informatique, et, plus tard, par ceux des télécommunications. Le large déploiement de réseaux fixes et mobiles à haut débit, le taux de pénétration élevé des équipements numériques au sein des ménages non seulement des pays développés, mais aussi des pays en développement (pour ce qui est du téléphone mobile, notamment), l'émergence de plateformes de services transformant des secteurs d'activité entiers (transports, hôtellerie...) et la ramification d'Internet jusque dans les objets du quotidien (l'Internet dit « des objets ») constituent autant de phénomènes parvenus à maturité ou se dessinant

à une échéance proche. Les produits et services de cette transition se déploient pour l'essentiel selon des mécanismes économiques classiques (offrant une meilleure combinaison de fonctionnalités/prix que ceux auxquels ils se substituent), mais avec une vitesse de propagation accrue par des effets de réseau et des plateformes bifaces (*two sided*) (avec pour l'un des côtés (les usagers), la possibilité d'un accès gratuit à un panel de services).

En comparaison, la transition écologique est d'une tout autre nature : elle est non pas impulsée par le progrès technique, mais par la nécessité de transformer un modèle de croissance, qui, en vigueur depuis deux siècles, est excessivement producteur d'externalités négatives, tout particulièrement en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de dégradation de la qualité de l'air, de l'eau, de la biodiversité... Les technologies mises « en examen » ne sont toutefois pas frappées d'obsolescence : les centrales à charbon restent performantes pour produire de l'électricité, les véhicules thermiques offrent un service de transport également efficace... Mais l'utilisation de ces dispositifs techniques n'est pas soutenable à moyen ou long terme, d'où la nécessité d'une transition promouvant des technologies de substitution plus respectueuses de l'environnement.

La difficulté est de taille, car il faut agir à rebours des mécanismes économiques conventionnels en remplaçant des technologies encore efficaces pour le service qui en

est attendu (nonobstant les externalités négatives induites par leur usage) et reposant sur des ressources souvent abondantes et accessibles à des prix acceptables : charbon, pétrole et gaz seront disponibles très au-delà de ce siècle et, en tendance, les cours auxquels ils sont vendus ne conduisent pas à leur éviction spontanée des mix énergétiques. Il s'agit donc de remplacer ces technologies par d'autres qui, étant plus coûteuses et/ou moins efficaces (du fait de leur intermittence, pour l'électricité d'origine solaire ou éolienne, ou d'un rayon d'action réduit, pour les véhicules électriques...), ne disposeraient pas d'un espace économique initial en l'absence d'un soutien public *via* des mécanismes de taxes/subventions ou des réglementations contraignantes/incitatives.

Enfin, en ce qui concerne la lutte contre le changement climatique, la transition doit être opérée sous une forte contrainte de temps, ce qui soulève des questions complexes en matière de choix intergénérationnels : les humains de la première moitié du XXI^e siècle doivent prendre à leur charge les coûts d'une transition destinée à contenir des risques (drastiques) qui pèseront avec le plus d'intensité sur les générations de la fin de ce même siècle. Des questions qui bien évidemment ne se posent pas pour la transition numérique.

Deux transitions ne convergeant pas naturellement...

L'influence parfois « disruptive » du numérique dans l'organisation de nos sociétés implique de comprendre son influence sur les problématiques environnementales et, plus singulièrement, sur les efforts de lutte contre le changement climatique : l'enjeu est de déterminer si le concours du numérique peut apporter des ruptures (exportant, en quelque sorte, la « loi de Moore » dans le monde des technologies « bas carbone ») permettant de rejoindre la trajectoire des 2 °C.

Mais une telle investigation ne doit pas être univoque, car il s'agit de s'interroger sur les effets d'une transition numérique qui pèse sur les contraintes écologiques, aussi bien directement (*via* les consommations énergétiques des équipements) qu'indirectement (*via* certaines pratiques sociales dont le numérique encourage le développement, comme le tourisme).

Pour se convaincre que la transition numérique n'est pas intrinsèquement un antidote aux crises écologiques, il suffit d'observer que l'accélération des émissions de CO₂ à partir des années 1990 est concomitante au déploiement d'une « grappe d'innovations » dans le champ de l'électronique et des télécommunications. En déduire que c'est la numérisation qui produirait la menace climatique serait évidemment excessif, la croissance des émissions de gaz à effet de serre étant d'origine multifactorielle (approfondissement de la globalisation, essor des économies émergentes, poursuite de la croissance démographique). Mais à l'évidence, la numérisation n'a pas endigué la progression desdites émissions...

Quelques indices concourent à expliquer pourquoi la transition numérique n'est pas intrinsèquement « écologique » :

- la fabrication des équipements consomme des res-

sources minérales (un *smartphone* contient de l'étain, du cuivre, du cobalt, du lithium...) et de l'énergie. Les *data centers*, dont le foisonnement est un bon marqueur de la numérisation, représentent 5 % de la consommation électrique mondiale (notamment pour assurer leur refroidissement). Les entreprises en charge des fermes de serveurs, les GAFAs en tête, et les fournisseurs d'équipements ne restent pas sans réaction : les efforts qu'ils déploient en matière de récupération de chaleur, de *sourcing* d'une électricité décarbonée et de création d'algorithmes optimisant l'efficacité énergétique attestent de l'importance qu'ils accordent à ce problème ;

- les services offerts par les plateformes numériques, même les plus « vertueuses » en première analyse, présentent des bilans environnementaux contrastés : les systèmes de covoiturage partagent des trajets en automobile, mais ils comportent une partie de report modal à partir du train (avec un effet global souvent négatif sur longue distance) ; les sites de location d'appartements entre particuliers valorisent des capacités d'accueil non ou sous-utilisées, mais ils favorisent aussi le tourisme, et donc des déplacements lointains... Plus globalement, les gains énergétiques associés au numérique ne sont pas exempts d'effets rebond ;
- le numérique est également un outil d'optimisation énergétique, dans les filières fossiles. En réponse à l'effondrement des prix du pétrole en 2014, il a été procédé, grâce à la réduction du coût des capteurs, à une numérisation des installations d'exploration-production et à l'expansion des démarches de « *data analytics* ». C'est notamment ce qui explique les gains d'efficacité enregistrés par l'industrie du pétrole de schiste aux États-Unis, qui, en abaissant son point mort, a pu résister à l'effondrement des cours mondiaux (participant, en retour, au maintien des cours mondiaux du baril à des niveaux modérés).

... mais présentant un large espace de convergences...

Malgré ces réserves, il ne fait pas de doute que la numérisation est une condition de la réalisation de la transition énergétique. La complexification des systèmes électriques par l'insertion massive de moyens de production décentralisés (éolien, photovoltaïque, biogaz...), par l'adjonction progressive de capacités de stockage, par le besoin de flexibilisation de la demande, par le développement de nouveaux usages (véhicules électriques, en particulier), requiert des moyens de pilotage faisant très largement appel aux technologies relevant du numérique.

C'est sans doute dans la « *smart city* », zone de convergence entre les transitions écologique et numérique, que ces synergies se dessinent le plus nettement. Cette convergence est dictée par l'exode vers les villes : 52 % de la population mondiale est urbaine (dans des villes dont la superficie ne couvre que 2 % de la surface du globe), une proportion susceptible d'atteindre 70 % en 2050. Les aires urbaines dominent également en matière de consommation d'énergie primaire (65 %) et d'émissions de gaz à effet de serre (70 %). C'est dans ce contexte qu'émergent des *smart cities*, sous des formes hétérogènes, qui ont cepen-

dant en commun d'optimiser la gestion des données dans le but d'améliorer les services urbains : transports, énergie, déchets, habitat, santé, éducation, culture...

Un des moteurs essentiels de ces transformations est une volonté de contenir la pandémie des pollutions urbaines et de prévenir les risques de thrombose auxquels conduirait mécaniquement la poursuite, au XXI^e siècle, d'une forme d'exode vers les villes. Le développement de « *smart mobilités* » est le pivot des transformations qui s'annoncent. Cette problématique ouvre sur une profusion de solutions que les villes combineront dans des modèles locaux *ad hoc* : mutations de l'espace urbain avec des cités plus compactes, gestion dynamique du trafic, multi-modalités étendues... Naturellement, la place des véhicules thermiques en ville se trouve questionnée, avec la diffusion à plus ou moins long terme de substituts dans la motorisation (véhicules électriques), dans le pilotage (véhicules autonomes), dans le mode d'appropriation (autopartage, covoiturage) ou dans le modèle économique (plus riche en services)... Cette transformation met en scène des acteurs qui jusqu'ici se situaient en périphérie de l'industrie de l'automobile : les GAFAs, les *utilities*, des groupes de services aux collectivités...

La *smart city* est innervée par les technologies de l'information, les interconnexions horizontales *via* les réseaux sociaux, la multiplication des écrans et des interfaces nouvelles (allant du *smartphone* aux pare-brise intelligents) propices aux expériences de réalité augmentée. Comme cette ville produit des données à profusion, les conditions de leur diffusion (données « *open* » ou non), la capacité de leur traitement et leur valorisation ouvrent sur un espace d'innovations nouvelles susceptibles de conduire vers la disruption dès lors que des plateformes « *two-sided* » (Airbnb et Uber, pour l'heure) s'érigent en intermédiaires de référence. Même si le potentiel de rupture des *smart cities* procède avant tout du numérique (et du phénomène de plateforme d'interconnexion), c'est sa combinaison avec les progrès techniques réalisés dans le bâtiment et dans l'énergie qui permettent de concevoir des édifices à énergie positive (associant efficacité thermique, insertion d'énergies renouvelables au bâti et capacité de stockage de l'énergie) et de les articuler dans des éco-quartiers, qui permet d'esquisser des paysages urbains entièrement nouveaux.

Notons qu'en outre, la distinction entre offreurs et consommateurs de services s'estompe dans ce contexte. L'application des technologies de l'information et de la communication à la ville réclame un investissement croissant de la part d'utilisateurs appelés à devenir de plus en plus étroitement associés à la gestion des nouveaux services qui leur sont proposés. C'est le cas en ce qui concerne les *smart grids*, ces nouveaux réseaux intelligents de production et de distribution d'électricité (et de gaz), l'utilisateur final étant susceptible d'agir sur l'offre d'énergie (notamment *via* des capacités de production intégrées à son habitat), de moduler sa demande (en fonction des contraintes de la production et notamment de la nécessité de réduire la charge en CO₂ de l'électricité produite, en réagissant à des signaux de prix), voire de contribuer à l'équilibre du système électrique *via* la capacité de stockage de son véhicule électrique (interconnexions « *vehicle to grid* » et « *vehicle to home* »).

... voire d'innovations de rupture ouvrant sur une désintermédiation

Un détour par la *blockchain* nous permettra d'illustrer le potentiel de ruptures se situant à la convergence entre transition écologique et transition numérique et, surtout, de suggérer que ces évolutions ne seront pas nécessairement intermédiées par des plateformes.

La *blockchain*, qui est à l'origine du *bitcoin* (monnaie cryptographique créée en dehors de l'intervention d'une banque centrale), est une technologie de transaction pair-à-pair permettant le stockage décentralisé et le cryptage de transactions *via* l'enchaînement de blocs de données inviolables. Des « *smart contracts* » contenant des règles définissant des volumes, des qualités et des prix des transactions, permettent la rencontre autonome et décentralisée d'offeurs et de demandeurs, pour des coûts de transaction réduits.

Des développements se dessinent ainsi en matière de « prix » du carbone. La *blockchain* offre la possibilité d'organiser des écosystèmes localisés en complément des marchés de permis d'émission (de type SCEQE - système communautaire d'échange de quotas d'émission - en anglais : EU ETS) : chaque tonne de CO₂ émise est enregistrée *via* la *blockchain* sous la forme d'un « *token* » (un jeton d'authentification).

Sur cette base, pourraient être structurés des « marchés primaires » et des « marchés secondaires », sur lesquels ces *tokens* (sorte de monnaie carbone bénéficiant d'une traçabilité propre à éviter toute tentative de fraude) seraient échangés. Un tel système s'apparente à un processus de création monétaire autorégulé et fléché climat, susceptible d'être organisé sur une base délimitée (comme celle d'une collectivité locale désireuse de piloter une trajectoire de décarbonation ou encore celle d'une entreprise développant un prix interne du carbone...) et permettant de développer « en archipels » des zones de prix du carbone susceptibles d'être interconnectées. Les garanties offertes par la *blockchain* permettront également de créer des registres d'émissions de CO₂ favorisant la mise en œuvre de l'Accord de Paris dans les pays en développement.

Dans le secteur de l'énergie, la *blockchain* peut être utilisée pour des transactions relatives à une fourniture d'énergie. Des projets pilotes sont en cours, notamment autour d'une production électrique décentralisée et échangée « entre voisins » (dans un éco-quartier, une zone industrielle...). L'objectif est l'émergence de systèmes énergétiques dans lesquels producteurs et consommateurs concluent des contrats de fourniture d'énergie de manière automatisée et sans intermédiaire. Outre les processus de relevé de consommation et de facturation et les opérations de compensation, la *blockchain* permet également de certifier l'origine décarbonée de l'énergie échangée, favorisant ainsi le déploiement d'une logique d'économie circulaire.

Machine à fabriquer du consensus, du local jusqu'au global, la *blockchain* esquisse les ruptures que les déploiements du numérique introduiront dans l'organisation des systèmes énergétiques, et, plus largement, le potentiel d'innovations à mettre à l'actif de la transition écologique.

Les réseaux électriques intelligents : un marché aux frontières de l'énergie et de la domotique

Par Ivan FAUCHEUX

Directeur du programme « Énergie-Économie circulaire », Commissariat général à l'Investissement

L'intelligence, mot dérivé du latin *intelligentia*, formé du préfixe *inter-* (entre) et du radical *legere* (« choisir, cueillir ») ou *ligare* (« lier »), représente l'ensemble des processus de pensée d'un être vivant qui lui permettent de s'adapter à des situations nouvelles, d'apprendre ou de comprendre et, surtout, d'agir. De nos jours, tout devient intelligent (*smart homes, smart buildings, smart grids, smart mobility, etc.*), notamment dans le domaine de l'énergie. Or, sans paraphraser Michel Audiard ⁽¹⁾, une intelligence sans action reste stérile. En partant de l'exemple des réseaux électriques intelligents, nous nous attacherons dans cet article à tisser quelques liens entre les technologies de l'information et de la communication (TIC) et la transition écologique pour montrer qu'il peut y avoir, à la convergence de ces deux mouvements, une véritable économie d'un genre nouveau, et peut-être intelligente, à développer.

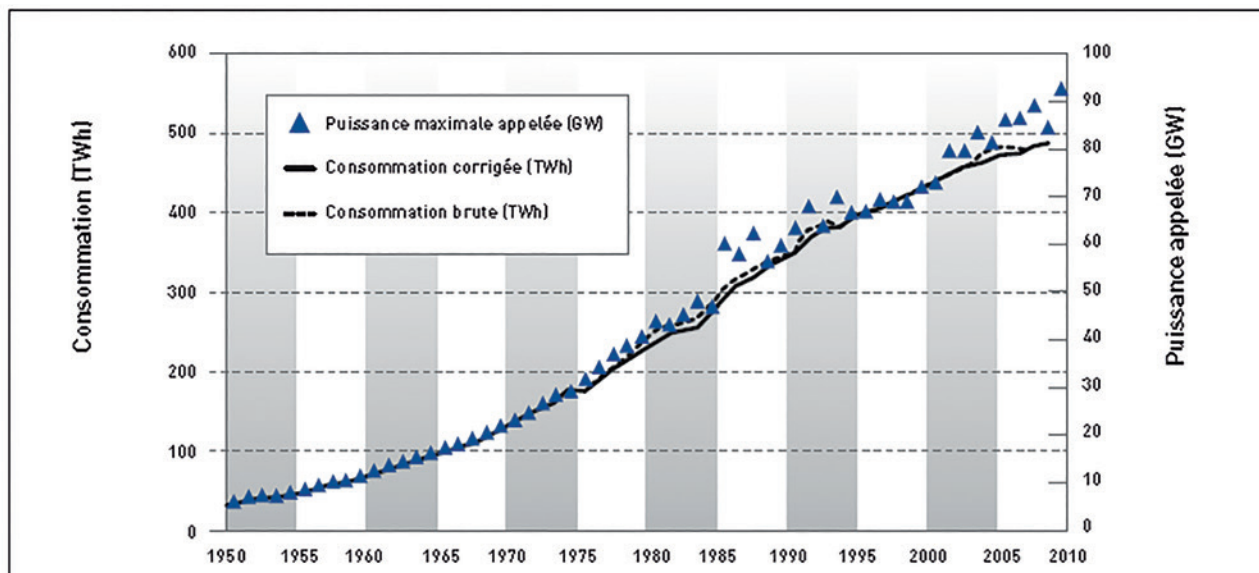
Les réseaux électriques intelligents, au sens de la Commission européenne (c'est-à-dire des réseaux d'électricité capables d'intégrer de manière intelligente le comportement et les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs, afin de maintenir une fourniture d'électricité efficace, durable, économique et sécurisée), représentent un eldorado pour les acteurs de l'énergie comme du numérique. En effet, pour les acteurs de l'énergie, la résolution du problème fondamental de la décorrélation entre la production et la consommation est devenue un enjeu majeur. D'un côté, la production des énergies renouvelables augmente et, de l'autre, la volatilité de la consommation s'accroît avec l'augmentation du niveau de vie et du besoin de confort. Maîtriser cette décorrélation sans passer par des investissements coûteux (comme le renforcement des réseaux ou des moyens de stockage) représente un enjeu intellectuel, mais aussi et surtout financier, pour des acteurs dont les capacités d'investissement ont été fortement diminuées ces dernières années (les investissements dans les énergies renouvelables attaquant de façon frontale les investissements historiques des énergéticiens, en les dépréciant de façon accélérée, et ce parfois en contradiction avec l'objectif de réduction des gaz à effet de serre...).

Pour les acteurs du numérique, le marché de l'énergie est petit en volume, mais il représente une stabilité bienvenue dans un monde où la rapidité du renouvellement technologique force à rebattre les cartes tous les trois ans.

De plus, les réseaux électriques intelligents permettent aux acteurs du numérique d'entrer de plain-pied dans la base clientèle des énergéticiens en enrichissant la connaissance que ceux-ci ont de leurs consommateurs au travers de nouvelles données. Enfin, l'émergence des objets communicants (IoT) privilégie aujourd'hui des marchés où le débit a moins d'importance que la fréquence des communications. À cet égard, l'énergie représente un marché intéressant pour le déploiement de ces solutions.

Les réseaux électriques intelligents posent donc la question de la redistribution des cartes entre les différents acteurs économiques : la question que doivent se poser les acteurs de l'énergie n'est pas tant de savoir le nombre de leurs clients que des nouveaux services qu'ils peuvent leur offrir. Or, dans ce domaine, les acteurs des télécoms, grâce à un renouvellement technologique beaucoup plus rapide, ont depuis longtemps intégré le renouvellement de leur offre de services aux clients comme un facteur critique et différenciant par rapport à leurs concurrents. Les rachats récents d'entreprises du secteur de la gestion de la demande énergétique par des acteurs comme Google démontrent que cet intérêt est loin d'être purement intellectuel, mais qu'il correspond bien à une stratégie de développement. Le risque pour les acteurs français, qu'ils

(1) « Un intellectuel assis va moins loin qu'un con qui marche. », Un taxi pour Tobrouk (1961).



Évolution de la consommation d'électricité en France et puissance maximale appelée.

	2012/13	2014/15	2019/2020	2024/25
Pointe à température normale (GW)	86,9	88,2	91,0	94,9
Pointe « à une chance sur dix » (GW)	102,0	103,8	107,7	112,0

Prévisions des puissances de pointe de l'hiver 2012/2013 à l'hiver 2024/2025 dans le scénario de « référence » du bilan prévisionnel 2009 de l'équilibre offre/demande (source : RTE).

soient des secteurs de l'énergie ou des technologies de l'information et de la communication, est de se retrouver marginalisés face aux géants américains du *Web*, qui, aujourd'hui, dominent le marché, s'ils ne coopèrent pas pour développer conjointement de nouvelles offres. En particulier, face aux GAF(A)M, qui possèdent des capacités financières sans commune mesure avec celles des énergéticiens ou des acteurs européens des TIC, le positionnement des acteurs nationaux doit être d'autant plus *smart* – pardon, intelligent ! –, qu'il ne peut être massif.

Aujourd'hui, force est de constater que le positionnement des acteurs nationaux voire internationaux s'en tient majoritairement à des expérimentations et que les déploiements de services à des échelles majeures se font attendre. Ce constat n'est pas spécifique à la France. Partout dans le monde, des *start-ups* émergent, proposent de nouveaux produits ou services, mais la mégacommande qui permettrait de lancer réellement le marché se fait encore attendre. Si les déploiements de Linky, le « compteur d'électrons », et de Gaspar, le « compteur des atomes de gaz », sont massifs, ils ne sont pas une condition suffisante pour un véritable déploiement de services innovants. En effet, les seules réductions de consommation que ces équipements doivent permettre sur la facture énergétique moyenne ne justifient que rarement l'investissement nécessaire, pour la majorité des consommateurs (de 80 à 100 €/an, pour des investissements de l'ordre de 1 000 à 1 500 euros...). Les évolutions du modèle historique qui ne se fonderaient que sur une amélioration incrémentale de ses performances ne sont pas évidentes à court et à moyen termes.

L'irruption d'un nouveau modèle

Dans le modèle décrit précédemment, un des postulats implicites est que le consommateur et le producteur d'énergie sont structurellement deux acteurs économiques distincts. Or, une telle distinction sera-t-elle toujours pertinente dans l'avenir ?

Avec le développement des enjeux d'autoconsommation, le consommateur finit par internaliser la contrainte de production des énergies renouvelables, car il est son propre client. Si l'autoconsommation fait aujourd'hui l'objet d'un engouement de communication plus que d'une réelle lame de fond économique, le sujet est pris au sérieux au point de peser dans les textes réglementaires d'un poids de plus en plus important.

Pour que ce modèle se développe, il reste cependant nécessaire que puissent se former des groupes d'acteurs qui puissent échanger hors des circuits commerciaux classiques des marchandises (des électrons, certes, mais plus largement des calories, des frigories, et plus si affinités...). En effet, l'autoconsommation a besoin d'atteindre un volume minimal pour commencer à avoir un impact significatif sur la consommation énergétique globale.

Ce modèle dans lequel des relations commerciales peuvent se construire rapidement hors des modèles commerciaux classiques et établis n'est pas sans rappeler ce qui se produit chez les particuliers pour les chambres d'hôtel, les taxis, le covoiturage ou la revente de matériel d'occasion. Tous ces modèles se développent sur la base

de deux conditions préalables :

- un actif, qu'un particulier a intérêt à vendre ou à mettre en location, compte tenu de l'investissement, car sa valeur marginale est nulle, sinon, pour un coût qui ne l'est pas ;
- un système d'information capable de transmettre de façon relativement fiable la qualité du bien cédé ou loué et une transaction financière sous-jacente.

Une des contraintes qui demeure aujourd'hui, pour l'énergie, qu'elle soit d'origine électrique ou gazière, est d'ordre logistique. Outre le coût du réseau, et contrairement aux réseaux de télécommunication, le transport d'énergie demeure physiquement contingenté, et donc coûteux. C'est pourquoi, comme pour des biens de faible valeur, pour lesquels la contrainte logistique prime sur la recherche du meilleur rapport prix/qualité, l'approche de telles communautés ou de tels groupes d'utilisateurs (consommateurs et producteurs) a vocation à rester locale.

Un nouveau modèle pour l'électricité : pourquoi maintenant ?

Un nouveau modèle de ce type ne s'impose cependant pas, car le prix de la valeur échangée est faible (quelques dizaines d'euros du mégawattheure, alors qu'un foyer français en consomme entre 4 et 5 par an), la contrainte logistique est forte et la dangerosité du métier rendent tout bidouillage chez soi réglementairement impossible. Quelle seraient donc les raisons qui pourraient conduire à ce qu'un tel modèle émerge ?

La première raison est le modèle intrinsèque de production des énergies renouvelables, qui relève clairement d'un modèle similaire à ceux de l'auto-partage ou de la location de biens mobiliers. En effet, dans les énergies renouvelables, le coût d'investissement reste majoritaire et le coût de production est souvent marginalement faible, voire nul. Contrairement à des biens classiques, l'enjeu que revêt une utilisation maximale des unités de production d'énergies renouvelables, qui ne pourront bénéficier sans limite de la priorité d'injection dans le réseau, est de plus en plus important. Si l'on rajoute à cette considération le caractère pérenne de ces actifs dans le patrimoine des acteurs économiques (de 20 à 30 ans), le jeu consistant à trouver des débouchés autres que sa propre utilisation en vaut, sur le long terme, clairement la chandelle (ou l'ampoule, pour faire plus moderne).

La seconde raison est la baisse importante du coût de production des énergies renouvelables qui peuvent, dans certaines configurations géographiques, devenir des énergies compétitives par rapport à celles que le réseau peut fournir. Associé à une forte baisse des coûts de stockage, un optimum économique ne semble plus être hors d'atteinte. Si l'on peut se prendre à rêver techniquement à des mix énergétiques de 100 % de renouvelables à l'horizon 2050, la vérité du marché se situera sans doute en-deçà, mais sans aucun doute avec une part d'énergies renouvelables significative, voire majoritaire.

La troisième raison est l'irruption de technologies numériques qui permettent d'assembler les différentes briques constituant un tel modèle économique : avec sa capacité

à prédire la production, à agir à distance sur les postes de consommation, à remonter une information fiable *via* les technologies de *blockchain*, et donc à permettre une facturation de ces échanges, le numérique a prouvé qu'il pouvait irriguer rapidement, et parfois brutalement, d'autres secteurs de la vie économique que les biens dématérialisés pour lesquels la transition appartient déjà à l'Histoire.

Enfin, la quatrième raison est que ce modèle économique commence à fonctionner avec des acteurs majeurs qui se positionnent en intermédiaires et sont capables de capter une part très significative de la marge de ces échanges, en contrepartie d'un investissement initial important, mais de coûts marginaux d'ores et déjà faibles. Amazon, Uber, Airbnb sont autant d'exemples d'acteurs qui, à des degrés divers de maturité dans leur développement, se sont positionnés sur ces modèles. Cela ne peut que donner à d'autres l'idée de reproduire de tels modèles.

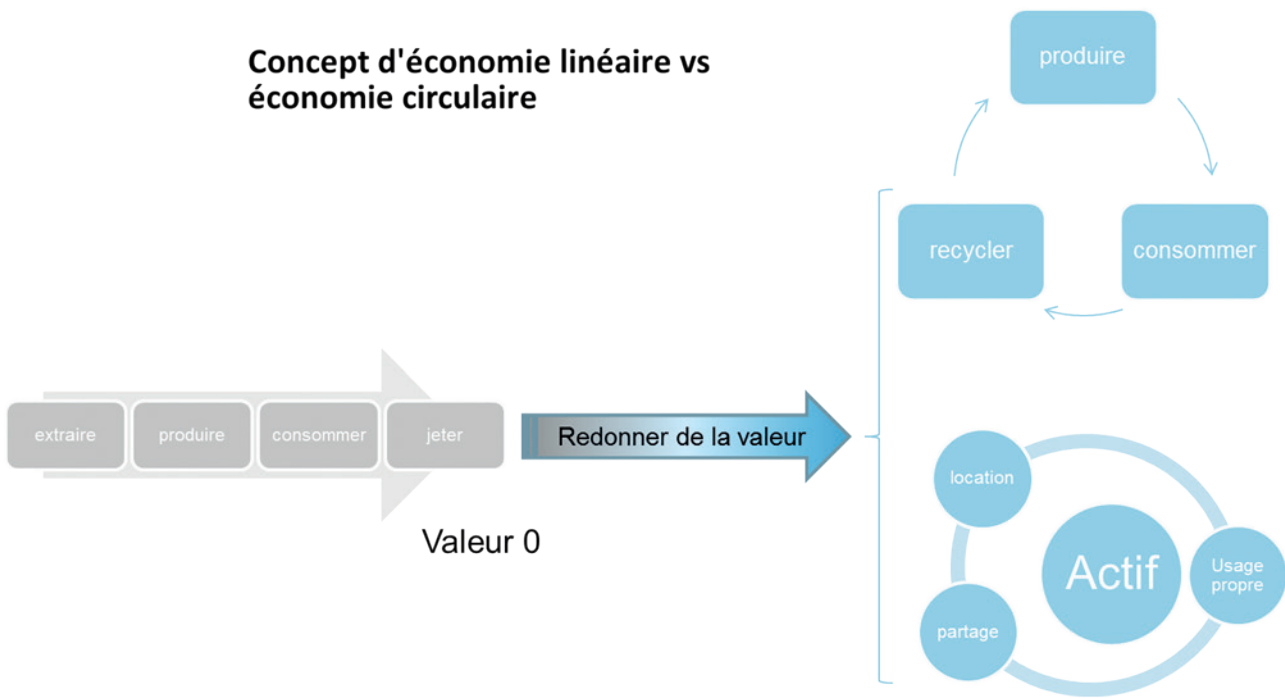
Et..., plus largement ?

La tentation peut être grande d'essayer de dupliquer le modèle aux biens écologiques, en se disant, qu'après tout, l'évolution inéluctable de nos sociétés est d'aller vers plus de sobriété dans la consommation irréversible des ressources, grâce à plus de capacités de communication, globalement. Cela suppose cependant de pouvoir donner une valeur à la nature. À part dans le cas du CO₂ (et des contributions à sa concentration dans l'atmosphère), dont la valeur à la tonne ne s'est pas révélée très probante dans le cadre des mécanismes de marché qui ont été instaurés (avec une très forte hétérogénéité entre les pays, des valeurs variant de 0,3 à plus de 300 euros/tonne selon les dispositifs publics mis en œuvre dans le monde), les autres ressources naturelles ont un prix qui n'est ni évident à fixer ni à faire admettre aux acteurs économiques.

La transition écologique (au sens plus large de cette expression) est sans doute favorisée par une efficacité accrue des technologies de l'information et de la communication. À la différence des réseaux électriques intelligents, qui rassemblent deux des facteurs critiques permettant l'émergence d'une réelle économie de l'échange entre des groupes non structurés de consommateurs et de producteurs (qui sont souvent les mêmes) – à savoir des biens à coût marginal faible et une compétitivité possible par rapport aux biens concurrents –, peu de secteurs semblent émerger naturellement.

À l'aune de la question « que permet d'apporter le numérique en tant que facteur différenciant de compétitivité, par sa capacité à traiter massivement des données et à diminuer les coûts de transaction de l'information ? », peu de secteurs apportent aujourd'hui une réponse convaincante. Hormis le secteur de la mobilité qui présente des caractéristiques analogues à celles des réseaux électriques, on peut citer, mais souvent encore de façon anecdotique, le recyclage des équipements ménagers, en s'appuyant sur une base de données des pannes qui permet de trier rapidement ces derniers en fonction des dysfonctionnements connus.

Concept d'économie linéaire vs économie circulaire



À quand une économie circulaire numérique ?

Dans la transition énergétique, et plus largement écologique, le concept d'économie circulaire est apparu : si diverses définitions sont souvent données, le principe de base de cette économie circulaire reste de redonner à un bien, dont la valeur d'usage, pour son propriétaire, est nulle, une valeur économique, soit par une transformation (recyclage), soit par une location (covoiturage pour une place de voiture, *car-sharing* pour une voiture complète).

Ce concept, finalement relativement ancien dans des domaines où les actifs sont particulièrement onéreux (par exemple, dans le bâtiment où la décorrélation entre la possession et l'usage est tellement ancienne que la valeur du bien n'est plus la somme actualisée des revenus que l'on peut en retirer, mais une valeur foncière qui échappe souvent au calcul économique...), reprend de la vigueur avec deux mouvements de fond :

- le premier est la transition écologique qui rend l'accès aux ressources naturelles plus contraint (soit en amont pour de nombreuses matières issues des activités minières, soit en aval pour l'énergie en raison de l'impact du relargage du carbone d'origine anthropique). La valeur qu'il faut redonner à un bien « hors d'usage », ou déchet, se compare naturellement au bien classiquement produit. Si le prix de ce dernier augmente, les coûts qu'il faut exposer pour redonner de la valeur au déchet, et donc la marge potentielle, peuvent être plus importants et donc inciter naturellement à le réutiliser ;

- le second, qui vaut essentiellement pour les valorisations par partage d'actifs, est l'abaissement des coûts d'information et de transaction. Le développement des plateformes de location ou d'échange nécessite des volumes très importants de transactions à réaliser pour permettre d'amortir les investissements nécessaires en amont.

Enfin, dans le domaine électrique, deux autres éléments, plus incidents, sont à prendre en considération :

- la chute du coût de production de l'électricité renouvelable ouvre une perspective de rentabilité intrinsèque. C'est pourquoi l'existence d'un modèle à terme est sûre, même si la date de son déploiement reste un pari hautement risqué ;
- le développement du véhicule électrique et du véhicule autonome (qui sont liés partiellement par le fait que l'électricité est le vecteur d'alimentation des équipements électroniques) permet de faire émerger de nouveaux acteurs de la mobilité : en effet, la conception d'un véhicule électrique est devenu finalement accessible pour de nombreux acteurs, là où la conception d'un véhicule thermique reste très complexe.

Ces nouveaux modèles sont encore très émergents, car l'atteinte d'une rentabilité économique est avant tout une affaire de coût et d'avantage compétitif. Cependant, la rapidité avec laquelle des acteurs peuvent se positionner sur ces nouveaux modèles peut conduire à des modifications profondes et violentes du paysage économique. À défaut de prévoir quand le train passera, tâchons de ne pas rester ce jour-là sur le quai !

La « *Digital Society* » : un scénario de transition énergétique à l'horizon 2072

Par Nadia MAÏZI

Directrice du Centre de mathématiques appliquées, Mines ParisTech, PSL Research University

Edi ASSOUMOU

Chargé de recherche au Centre de mathématiques appliquées de Mines ParisTech, PSL Research University

et Thomas LE GALLIC

Doctorant au Centre de mathématiques appliquées de Mines ParisTech, PSL Research University

À travers un exercice prospectif centré sur la question de la transition énergétique, nous proposons de discuter la compatibilité entre une « *Digital Society* », basée sur le déploiement du numérique, et la recherche d'un objectif de neutralité carbone pour la France à l'horizon 2072. Pour ce faire, nous envisagerons l'offre technologique « digitale » dédiée aux enjeux climatiques, dont le bilan pourrait être compromis par sa matérialité énergétique, si l'on n'y prenait pas garde. En parallèle, nous considérerons la question de la demande en prenant en compte l'évolution du mode de vie que l'option « *Digital Society* » engendrerait, et ses conséquences sur la consommation énergétique. Au-delà des résultats relatifs au scénario particulier que nous avons imaginé, cette étude démontre l'intérêt de décliner des outils d'aide à la décision dans une démarche prospective afin de construire les trajectoires sur lesquelles nous souhaitons nous engager.

2072, le rendez-vous

Un des messages d'alerte lancé par les scientifiques face au risque climatique fait référence au « seuil d'élévation » de la température moyenne qu'il serait dangereux de dépasser. Mentionné dans l'article 2 de la Convention Climat adoptée en 1992, c'est le chiffre de 2 °C qui a prévalu dans les arènes climatiques jusqu'à l'Accord de Paris, lequel (dans son article 2) évoque, pour la première fois, sous l'impulsion des pays désormais confrontés aux effets du réchauffement climatique⁽¹⁾, la nécessité de « *poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels* ». Sans être précisément fixé, un horizon est envisagé dans son article 4 pour atteindre la neutralité carbone, celui de la seconde moitié du siècle.

De là est née l'idée d'envisager, dans une approche prospective, ce qui pourrait se passer à l'échéance 2072 [1].

2072, un horizon symbolique qui séparera d'un siècle ses contemporains des alertes du Club de Rome publiées dans le rapport « *Limits to Growth* » [2] et des avertissements

lancés par le philosophe Cornélius Castoriadis soulignant le contraste entre « notre projet capitaliste, démentiel, d'une expansion illimitée » et les limites physiques de cette expansion. Car nul doute qu'en 2072, si les trajectoires ne sont pas infléchies, « les nombreux témoignages... comme autant de preuves de la non-soutenabilité de notre développement (accumulation des gaz à effet de serre, érosion sans retour de la diversité du vivant, avancée des déserts, pollutions diverses), autant de symptômes inquiétants de dégradations héritées de notre insouciance passée » relevés par Pierre Dumesnil, dans son article (paru en 2002) « Nouvelle économie, Toile et soutenabilité » [3], se seront largement multipliés et aggravés.

Il semble dès lors pertinent de confronter des images du futur afin de projeter quelque lumière sur 2072, cet avenir lointain et encore incertain. Pour cela, nous nous inscri-

(1) « Comme les pays de l'Alliance des États insulaires, petits États insulaires de l'océan Indien, du Pacifique, du Bangladesh et quelques autres pays victimes d'événements climatiques et menacés dans leur existence même.

vons dans une tradition prospective qui consiste à ne pas se réduire à l'extrapolation de l'existant, car : « si, comme les individus, les sociétés sont fréquemment déçues, c'est qu'on leur offre ce qu'elles demandent et non ce qu'elles désirent véritablement, sans savoir l'exprimer de façon adéquate » [4] ⁽²⁾.

Dans l'hypothèse où la France poursuivrait un objectif de neutralité carbone en 2072, nous nous sommes interrogés sur le caractère contributif et les écueils potentiels d'une « *Digital Society* » basée sur le déploiement du numérique.

Cet exercice nous a conduits à analyser le rapport de cette « *Digital Society* » à l'offre et à en évaluer les différentes facettes, avant de nous pencher sur la question de la demande.

Les technologies numériques, vecteurs de décarbonation de la « *Digital Society* »

L'engouement suscité par l'offre technologique ⁽³⁾ de la « *Digital Society* » relève en grande partie de son association au concept de « croissance verte », faisant écho aux performances attendues du numérique pour l'optimisation des produits et des flux d'énergie. En particulier, le déploiement de solutions dites « intelligentes » est présenté comme une contribution importante à la décarbonation du système énergétique.

Pour mieux s'en convaincre, revenons par exemple sur le contexte particulier de la mutation du secteur électrique. En augmentation continue depuis le début de l'exploitation de l'énergie électrique, les émissions de CO₂ de la production électrique pèsent pour plus de 45 % dans le bilan mondial. Cette position singulière est adossée à une explosion de la demande d'électricité due à la fois à la forte croissance des pays émergents et à la migration d'usages vers des sources « décarbonables ». Cela préfigure des investissements gigantesques dans la production d'électricité, auxquels s'ajoutent ceux nécessaires à la transformation des réseaux du fait de la concentration urbaine et d'une génération électrique plus dispersée avec l'essor des sources d'énergie renouvelables.

En tenant compte de ces éléments structurels, il s'agit d'opérer une transition qui permette au système électrique de s'adapter tout en conservant ses qualités de fourniture, en rationalisant ses investissements et en étant le moins émissif possible. Parmi la multitude de recommandations formulées pour servir cet objectif, on trouve : la promotion de solutions bas carbone du côté de l'offre (renouvelables, nucléaire, capture et stockage du CO₂) ; des instruments de marché associés à des engagements politiques (marché EU-ETS, taxes et subventions, tarification dynamique, textes de loi...) ; et, enfin, la promotion de l'efficacité énergétique et des renouvelables du côté de la demande.

Le numérique y est appelé à permettre une gestion intégrée au travers de solutions intelligentes dédiées aux réseaux, à la mobilité électrique, à l'intégration des renouvelables intermittentes ou au pilotage des usages.

C'est dans cette association optimisée des paradigmes de réseaux centralisés et décentralisés que ses contributions seront essentielles. Elles devront néanmoins respecter le contexte spécifique de la gestion électrique, dont l'impératif est le maintien instantané de l'équilibre offre/demande. Cela s'opère schématiquement en fonction de deux options :

- soit investir dans des capacités permanentes de production et de transport supplémentaires qui, par le surdimensionnement et l'inertie d'un système centralisé global, permettent de faire face à tout appel intempestif de puissance ;
- soit favoriser une gestion dynamique, souple, précise et décentralisée des capacités pour satisfaire localement les besoins en puissance *via* du stockage et des appareils de contrôles intelligents implantés sur le réseau. C'est probablement à ce stade qu'il convient d'évaluer l'apport des solutions numériques et des solutions intelligentes, notamment pour leurs capacités de *monitorer* des systèmes [5,6].

Cet arbitrage entre, d'une part, le surdimensionnement d'un système électrique centralisé – qu'il s'agisse des pertes par effet Joule ou du contenu énergétique des infrastructures –, et, d'autre part, les capacités de *rush-production*, de stockage et de *monitoring* d'un système décentralisé, pour une fiabilité donnée de la disponibilité, relève de l'analyse du cycle de vie.

Aussi, la matérialité énergétique des technologies numériques doit être envisagée. En effet, si l'on s'interroge sur les enjeux sous-jacents à l'offre technologique « digitale », force est de constater que son assimilation à une solution vertueuse pour l'écologie a pu être un peu trop rapide.

La matérialité énergétique de la « *Digital Society* »

L'émergence des technologies numériques suscite un grand espoir pour l'accompagnement de la réduction des gaz à effet de serre en ouvrant la perspective du déploiement de solutions permettant une utilisation plus rationnelle de l'énergie. Si cet avènement s'est accompagné à ses débuts d'un optimisme excessif prônant l'idée qu'une dématérialisation structurelle [7] serait associée à l'usage de ces nouvelles technologies, la controverse autour de leur matérialité énergétique a été rapidement engagée [8].

Aujourd'hui, les impacts énergétiques, conséquences de l'utilisation du numérique, sont largement reconnus : ils se mesurent concrètement à l'aune de l'augmentation de la consommation électrique associée. Tout le monde s'accorde sur le fait que l'utilisation d'Internet et la croissance des équipements liés à l'information et à la communication induisent des surplus de consommation importants,

(2) « *L'Avenir des sciences de l'homme* », p. 39 (Texte de Berger G., 1956).

(3) *Sous cette appellation, on regroupera les solutions matérielles et logicielles liées au déploiement du numérique, indifféremment désignées par : technologies de l'information, du digital, du numérique ou simplement numérique.*

les estimations de cette empreinte énergétique étant déclinées par composant (DRAM, microprocesseur), par dispositif (PC, console...) et, enfin, par usage (mesures *in situ* (Data Center) et Internet).

Ainsi, en 2009 [9], la part de la consommation électrique liée à l'usage des technologies de l'information et de la communication était estimée en France à environ 13,5 % de la consommation totale, soit un niveau oscillant entre 55 et 60 TWh/an. La progression de la puissance des microprocesseurs, selon la loi de Moore [10,11], a généré les années suivantes une augmentation de la consommation (10 % par an) bien plus forte, au regard de l'encombrement de ces équipements. L'ensemble des pertes liées à la veille des biens de consommation électriques de la maison (dans lesquels la part de l'ordinateur personnel est de plus en plus importante) représente déjà, dans les années 2000, entre 5 et 15 % de la consommation énergétique résidentielle [12] et l'intensité électrique en France croît avec l'usage des ordinateurs [13].

Il faut donc améliorer l'efficacité énergétique des technologies digitales elles-mêmes (par exemple, la performance des mémoires [14]) au même titre que celle des techniques de domestication de l'énergie. Mais, sans doute, convient-il au préalable de quantifier l'enjeu énergétique lui-même. Dans cet exercice, on rejoint les interrogations sur la valeur énergétique théorique de la manipulation d'un bit d'information, qui est à la base du fonctionnement de la « *Digital Society* ». Théoriquement, cette valeur ne peut pas être nulle, car le *bit-flip* correspond à une manipulation d'ordre sur l'information manquante et le respect du second principe de la thermodynamique impose que l'on ne puisse réduire l'entropie sans dépenser d'énergie. Ainsi, la nécessaire réflexion sur ce sujet d'ordre fondamental, voire philosophique, est à mettre en regard avec la consommation consolidée actuelle d'un *gigaflop* (*Gflop*) [15].

Le risque existe donc que l'utilisation irraisonnée des solutions numériques conduise à une équation énergétique contreproductive. Cette préoccupation doit animer l'esprit de quiconque est convaincu qu'en agissant à la fois sur un usage qui fonde la croissance économique et sur une technologie qui deviendrait partie intégrante d'un réseau « universel » d'énergie, l'effet de levier et l'enjeu d'optimisation seraient considérables et constitueraient peut-être le plus efficace des gisements de croissance durable.

Le mode de vie de la « *Digital Society* »

Construire une articulation technologique adéquate n'apporte qu'une réponse partielle à la question d'un développement économique sans détérioration environnementale proportionnelle et qui soit socialement acceptable. En effet, le point de vue de l'offre doit être réconcilié avec celui de la demande, la réalité du terrain social se montrant parfois réticente aux innovations techniques. Ainsi, les expériences de démonstrateurs déployés à grande échelle ont permis de mettre en lumière le fossé qui sépare le prototype de sa mise en œuvre pratique, lorsque les volontaires se font rares, rechignent à voir installer dans leur intimité

des compteurs intelligents qui sont vus comme intrusifs, et trouvent peu de motivation à un bouleversement de leurs habitudes, du fait d'un retour financier faible ou de la difficulté de faire un lien direct entre les objets connectés proposés et la question écologique. Comportements et modes de vie constituent, au-delà de l'offre technologique disponible, des éléments clés d'une orientation vertueuse vers une société décarbonée.

Pour compléter notre réflexion, nous évaluerons donc l'adéquation du mode de vie de la « *Digital Society* » explorée avec l'atteinte de l'objectif d'une neutralité carbone en 2072. Une approche statistique dédiée [16,17] permet à travers un scénario d'examiner cette « *Digital Society* » que nous envisageons plus individualiste, technologique et numérique [18].

Nous proposons une déclinaison des éléments structurants de cette société comme suit : la volonté de développement personnel conduit davantage d'individus à vivre seuls et entraîne une diminution du désir d'enfant ; l'attention accrue portée à la santé conjugue à un budget consacré plus important entraîne un allongement de l'espérance de vie ; pour accéder aux loisirs et aux services les plus recherchés, la plupart des ménages vivent dans les grandes métropoles et plus particulièrement en centre-ville ; davantage d'activités (en particulier, les activités sociales, le travail et les achats) sont réalisées virtuellement, au domicile.

L'analyse tant économique [19] que technologique [1] de ce mode de vie révèle une explosion des consommations et des besoins en services. Le scénario de la « *Digital Society* » en 2072, par rapport à l'année de référence, 2010, conduit à :

- une croissance de 34 % de la surface totale des résidences principales, principalement tirée par le phénomène de décohabitation et atténuée par l'attrait pour les grandes villes (dans lesquelles les logements sont en moyenne significativement plus petits que dans les espaces ruraux ou périurbains) ;
- une demande en électricité spécifique en évolution de + 36 %, une croissance supérieure à celle de la démographie ;
- une réduction de la mutualisation des véhicules à l'échelle des ménages, compensée, toutefois, par des déplacements des populations dans des espaces urbains plus denses, où l'équipement automobile est un peu moins courant ;
- un rapport aux technologies tiré par une homogénéisation des niveaux d'équipement sur le modèle des ménages les plus équipés qui entraîne de 1,8 à 2,3 fois plus d'achats (respectivement d'équipements audiovisuels et de matériel informatique et appareils numériques) ;
- une diminution des distances totales parcourues de 11 %, du fait d'une substitution d'une partie de la mobilité physique par de la mobilité virtuelle ;
- une population plus urbaine, plus aisée et, surtout, intrinsèquement plus portée sur les voyages à longue distance, dont la demande explose (+ 115 % en distances parcourues, et + 77 % en nombre de déplacements).

Globalement, la consommation d'énergie totale du scénario « *Digital Society* » augmente de 31 % en 2072 par rapport à la situation actuelle. Au-delà des progrès ou des ruptures technologiques, il paraît donc incontournable d'inclure cette dimension sociétale. Or, jouer sur ce levier, c'est impacter les modes de vie. Cela signifie qu'il faudra rebattre les cartes afin de réfléchir à la façon dont la société doit envisager son développement et, sans doute, renoncer à la vision individualiste et techno-centrée que nous avons envisagée ici.

Au cœur du débat sur les transitions énergétique et numérique s'invite donc la question de nos modes de vie, qui est centrale, de notre point de vue. La bonne nouvelle, c'est que nous disposons de tous les outils de prospective pour interroger à la fois les orientations sociales et environnementales, des outils qui nous permettront de réaliser un *design a priori*, et non pas un constat *a posteriori*, car « *Il ne s'agit pas de choisir entre prévision et prospective, mais de les associer. Chacune exige l'autre. Il faut, à la fois, savoir dans quelle direction on marche et s'assurer de l'endroit où l'on va poser le pied pour [faire] le prochain pas* » Gaston BERGER (1959) [4].

Bibliographie

- [1] MILLOT A., LE GALLIC T., DOUDARD R., ASSOUMOU E. & MAÏZI N. (2017), "Carbon neutrality challenges for France in 2072", *International Energy Workshop*, Maryland, July.
- [2] MEADOWS D. H., MEADOWS D. L., RANDERS J. & BEHRENS W. (1972), *The Limits to Growth*.
- [3] DUMESNIL P. (2002), « Nouvelle économie, Toile et soutenabilité », *Terminal*, L'Harmattan, n°87.
- [4] BERGER G., de BOURBON-BUSSET J. & MASSÉ P. (2007), *Textes fondamentaux de la prospective française 1955-1966*, L'Harmattan.
- [5] DROUINEAU M., MAÏZI N. & MAZAUURIC V. (2014), "Impacts of intermittent sources on the quality of power supply: The key role of reliability indicators", *Applied Energy* 116, pp. 333-343.
- [6] ZHANG Y. & REN Z. (2005), "Optimal reactive dispatch considering costs of adjusting the control devices", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, n°3, August.
- [7] ROMM J., ROSENFELD A. & HERRMANN S. (1999), *The Internet Economy and Global Warming*, The Center for Energy and Climate Solutions.
- [8] FAUCHEUX S., HUE C. & PETIT O. (2001), « NTIC et environnement : enjeux, risques et opportunités », Cahier n°01-03, Centre d'économie et d'éthique pour l'environnement et le développement (C3ED), UMR (IRD, UVSQ), Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines.
- [9] BREUIL H., BURETTE D., FLURY-HERARD B., CUEUGNIET J., VIGNOLLES D. & BOISSON H. (2009), *TIC et développement durable*, La Documentation Française, mars.
- [10] WILLIAMS E., AYRES R. & HELLER M. (2002), "The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices", *Environmental Science & Technology* 36 (24), December 15, pp. 5504-5510.
- [11] MATTHEWS H. S. (2001), "The environmental implications of the growth of the information and communications technology sector", OECD, March 16.
- [12] BERKHOUT F. & HERTIN J. (2001), "Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: speculations and evidence, report to the OECD", May 25.
- [13] COLLARD F., FÈVE P. & PORTIER F. (2005), "Electricity consumption and ICT in the French Service Sector", *Energy Economics* 27, pp. 541-550.
- [14] DEMIGNY D. & FILIPE A. (2005), « MRAM et architectures de calcul », présenté à l'École thématique du CNRS, *Le spin dans les semi-conducteurs : physique et applications*, octobre, La Grande-Motte, France.
- [15] GERSHENFELD N. (1996), "Signal entropy and the thermodynamics of computation", *IBM Systems Journal* 35, pp. 577-586.
- [16] LE GALLIC T., ASSOUMOU E. & MAÏZI N. (2016), "Future demand for energy services through a quantitative approach of lifestyles", in *11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*.
- [17] LE GALLIC T., ASSOUMOU E. & MAÏZI N. (2016), "Investigating long-term lifestyles changes in France : a statistical and modelling approach", in *22nd International Sustainable Development Research Society Conference (ISDRS)*.
- [18] LE GALLIC T., *Exploration des évolutions des modes de vie dans les exercices de prospective énergie-climat : développement méthodologique en vue d'appréhender la réalité socioéconomique d'hypothèses de rupture*, thèse en préparation, Mines ParisTech.
- [19] BRIENS F. (2015), *La Décroissance au prisme de la modélisation prospective : exploration macroéconomique d'une alternative paradigmatique*, thèse Mines ParisTech.

Numérique et énergie, entre rêve et réalité

Par Alain BOURDIN

Professeur des universités, directeur de la *Revue Internationale d'Urbanisme*

Toute action a besoin de se fonder dans l'imaginaire pour être socialement acceptable et pour mobiliser les acteurs et les usagers. Nous montrerons dans cet article la faiblesse de la mobilisation des imaginaires en ce qui concerne la transition énergétique, l'énergie et leurs relations. Les visions technicistes l'emportent sur celles qui mobilisent un imaginaire positif. Aucun récit ne s'occupe de rassurer sur les effets d'accélération de la vie quotidienne provoqués par les technologies numériques. Enfin, les quelques éléments imaginaires existants ne sont pas en mesure de donner sens aux changements d'usages et de comportement, alors que les résultats obtenus par la contrainte ne sont pas satisfaisants.

Même la plus rationnelle et la plus calculée des actions mobilise l'imaginaire. On ne peut changer le monde sans rêver à ce que l'on souhaite qu'il devienne. Aussi technocratique ou managériale soit-elle, toute pensée s'adosse à une vision du monde (les « valeurs » et les « visions » des campagnes électorales) qui s'enracine dans des imaginaires. Mais ces imaginaires de l'action diffèrent fortement. Ils n'ajoutent pas seulement quelques fioritures au raisonnement qui construit l'action, ils en occupent le cœur, de manière visible ou invisible. Quand Hitler demande à Albert Speer de construire un Berlin monumental qui puisse « faire de belles ruines », cela éclaire la dimension crépusculaire du projet d'un « Reich de mille ans ». Le général de Gaulle aurait-il porté aussi vigoureusement le projet de modernisation de la France si cela n'avait pas correspondu à sa vision politique du destin de la France, elle-même référée à une vision de l'Histoire qui s'enracinait dans un imaginaire de la nation française ?

L'action n'est jamais complètement dissociable de l'imaginaire qui la sous-tend. Mais celui-ci peut appartenir à un individu, à un groupe, à une caste ou, largement partagé, devenir social. Certaines images, certains rêves s'avèrent très mobilisateurs par eux-mêmes, quand d'autres renvoient directement à un socle commun de représentations sociales largement partagées. Les sociétés du bien-être se sont en grande partie construites autour d'un imaginaire positif partagé, qui entraînait – au moins superficiellement – l'acceptation par tous de contribuer à cette construction. Et c'est lorsque les premières manifestations du refus de payer « pour les autres » sont apparues en Californie, que l'on a compris que cet imaginaire commençait à se défaire. La réussite de l'action publique – en particulier quand il s'agit de transformations

sociales – exige la mobilisation ou la création d'un imaginaire partagé.

L'évocation des mouvements citoyens introduit un autre élément. Cet imaginaire partagé sert-il à justifier et à rendre socialement acceptables des mutations voulues, orientées ou simplement accompagnées par les autorités publiques et les grands acteurs sociaux, ou bien a-t-il un effet direct sur les comportements individuels ? Quels éléments de l'imaginaire social faut-il mobiliser pour donner envie à un grand nombre d'automobilistes de conduire plus prudemment ? Différentes campagnes de communication et leurs résultats ambigus nous ont appris que, là comme ailleurs, la réponse n'a rien de simple. Pourtant, aucun responsable – tout au moins dans l'action publique – ne peut échapper à ce type de question.

Dire si, d'un point de vue sociologique, le numérique est un outil et un accélérateur de la transition énergétique, ou s'il peut le devenir, implique alors de poser deux questions :

- Existe-t-il un imaginaire qui associe transition énergétique et transition numérique dans une vision positive partagée de l'avenir possible des sociétés et qui mérite qu'on le construise ? S'il n'existe pas, peut-il être créé ?
- Cet imaginaire a-t-il – peut-il – avoir un impact sur les comportements et les usages dans la vie quotidienne ?

On croit revenir quarante ans en arrière – avant le rapport Bruntland...

Le développement durable présente au moins l'avantage de porter l'image de ce qui dure, de ce qui mobilise le patrimoine, la sécurité, les repères que l'on ne perd pas, etc.

Même seulement qualifié de « soutenable », il gardait un peu de cette force mobilisatrice.

Qu'est-ce que la transition énergétique ? Pas même un tournant, encore moins une révolution ! Plutôt le même type d'objet que la « transition démographique » : un ensemble de faits constatés, qui marquent le passage d'un ancien état d'équilibre à un nouveau.

Heureusement, les acteurs de la transition démographique ont bien autre chose en tête : une idée de la famille, de la consommation, du bonheur, de l'avenir...

Difficile de trouver une idée qui mobilise aussi peu l'imaginaire collectif que celle de transition énergétique, qui est renvoyée de ce fait à la sphère purement technique, du côté des énergéticiens ou de celui des fabricants de politiques publiques.

En effet, l'énergie ne bénéficie pas, quant à elle, de références à un répertoire imaginaire fort. Il n'y a pas – ou plus – d'imagerie de l'énergie. Le temps est passé où l'on pouvait la relier à des images fortes, celle du cheval-vapeur incarnée par de puissantes machines industrielles (et surtout les locomotives) et celle de la « Fée Électricité » qui donne accès à un bien infiniment précieux et identifiable, la lumière.

Aujourd'hui, les représentations simples de l'énergie manquent cruellement, même si, en définitive, elle est omniprésente dans notre vie quotidienne.

De ce fait, notre rapport à l'énergie devient nécessairement abstrait et vide d'image, d'où l'importance, lorsque l'on souhaite inciter et accompagner certains comportements en matière d'économies d'énergie, des dispositifs ludiques (concours, etc.).

À l'opposé de cette technicisation qui éconduit l'imaginaire, Jeremy Rifkin, avec sa troisième révolution industrielle (RIFKIN, 2012), propose un ensemble d'images de l'avenir qui peuvent sembler désirables et qui mobilisent fortement l'imaginaire contemporain. Dans l'univers auquel il nous fait rêver, chaque maison produit sa propre énergie ; la voiture électrique a définitivement triomphé, l'électricité nécessaire étant produite en grande quantité grâce aux sources d'énergie renouvelables ; le développement des outils numériques, outre qu'il permet de réguler la production et la distribution d'énergie, ainsi qu'une grande partie du fonctionnement de la vie quotidienne, fait triompher le travail à domicile ; les relations hiérarchiques (pyramidales) cèdent la place aux relations latérales (horizontales). On entre dans un monde de la mobilité, de l'individualité, de la coopération. On a là une série d'éléments de l'imaginaire de l'individualisation et le retour vers une vieille lune américaine, la fin des villes. Si ce dernier point paraît plus spécifique à certaines sociétés, l'association entre la transition énergétique et le processus d'individualisation peut prendre sens dans des contextes très différents. L'individualisation ne signifie pas l'absence de relations sociales et d'actions coopératives, voire d'altruisme : pour une part, l'attractivité des mouvements humanitaires repose sur l'association entre altruisme (choisi, volontaire, électif) et individualisation. Cette image du monde correspond aux aspirations de beaucoup, en particulier chez les diplômés.

Le récit de Rifkin est l'un des rares à associer aussi fortement les enjeux réels de la transition énergétique à l'utopie ou, au minimum, à l'imaginaire. Avec les mêmes ingrédients, on pourrait construire d'autres récits, par exemple, en valorisant la ville, ce qui représente un enjeu important. On imagine mal le monde entier vivant sur des territoires rifsiniens (en gros, *La Petite Maison dans la prairie* dans sa version durable et digitale). On constate également que les nouvelles technologies numériques permettent une foule d'applications contribuant au fonctionnement et à la gestion des villes.

Pourtant, les seules esquisses de récits disponibles sur la ville de la transition énergétique, les débats sur les *datas* et ce que nous livrent les informations quotidiennes nous font surtout penser à *Big Brother* (le roman de George Orwell (1984))...

On manque donc de récits pour enthousiasmer. On en manque également pour rassurer.

Les discours alarmistes se retournent parfois contre eux-mêmes en suscitant des raisonnements du type : « fichu pour fichu... ». Leur maniement présente donc des difficultés, ce qui ne signifie pas que l'on doive les éviter systématiquement. Mais si l'on inquiète, il faut montrer le chemin de la solution qui rassure.

Tout cela relève de la mise en place de récits mobilisateurs et de l'appel à l'imaginaire. Mais, en ce qui concerne le numérique, il s'agit également de rassurer sur un autre point, et d'une autre manière. Sortons un instant d'une mode calamiteuse : désormais, toute innovation se doit d'être disruptive. Il se peut que, dans le domaine des évolutions technologiques, et sans doute pour certains aspects de l'organisation des entreprises, cela ait un sens. Mais, sur le plan sociétal, c'est rechercher tout le contraire de ce que sont les processus observés. Les innovations qui réussissent (y compris quand il s'agit de produits tels que le téléphone portable) s'inscrivent toujours dans des continuités, des tendances, qu'elles font évoluer fortement, sans pour autant qu'il y ait de véritables ruptures. Les ruptures ne se caractérisent jamais par une grande acceptabilité sociale.

Or, si le numérique n'est pas nécessairement ou totalement disruptif sur le plan sociétal – on peut en discuter à l'infini –, il possède un extraordinaire pouvoir d'accélération. Ce pouvoir, qui ne concernait que les calculs et n'apparaissait pas clairement dans la vie quotidienne, l'a désormais envahie.

Dans la vie quotidienne contemporaine, les technologies numériques deviennent nos bottes de sept lieues. Tout va vite et loin.

À partir de là, on peut se sentir le roi du monde, ou éprouver un sentiment de maîtrise, parce que la consultation d'une application sur son *smartphone* permet de savoir où le RER est arrêté et pour quelle raison (ce qui ne le fait pas pour autant redémarrer).

Mais cela génère également l'inquiétude ou des sentiments de non maîtrise.

Réaction de vieux ? Pour une part, mais l'explication est un peu courte : même pour ceux qui sont nés après Internet, elles peuvent (comme d'autres avant elles, d'ailleurs, mais on l'a un peu oublié) entraîner l'inquiétude ou un sentiment d'incertitude. Je parle ici des technologies, ou, plus souvent, de ce dont elles sont porteuses : combien de lycéens (et pas seulement leurs parents) se sentent mal à l'aise devant le dispositif en ligne d'admission post-bac ? Pour cela aussi, il faut des récits qui rassurent et qui disent autre chose que la longue liste des escroqueries et des agressions perpétrées sur Internet.

Il faut un récit, quand il s'agit de mobiliser des éléments d'un imaginaire commun pour construire un imaginaire spécifique. Cela ne relève que très marginalement du travail des spécialistes de la communication – juste pour les mises en forme permettant une optimisation en fonction des différents canaux de communication. Ce processus est complexe et mobilise nécessairement différents talents, une capacité de créativité et une bonne connaissance des imaginaires sociaux en présence. Parmi ces talents, il y a ceux des techniciens, qui peuvent eux-mêmes contribuer à transformer leurs savoirs en récits.

Bref, l'imaginaire qui associe transition énergétique et transition numérique dans une vision positive partagée de l'avenir possible des sociétés n'existe pas de manière suffisante, dans des versions suffisamment diverses, exaltantes et rassurantes. Pour autant, sa création n'est nullement hors de portée, si tous les acteurs concernés sont persuadés de l'importance de cette démarche.

Qu'en est-il de l'impact d'un tel imaginaire sur les usages et les comportements quotidiens ?

Que tous ceux qui pensent que l'on fait changer les comportements par un claquement de doigts se rappellent du titre du livre de Michel Crozier (1982) : « On ne change pas la société par décret ».

Mais la contrainte ? Elle n'est pas sans effet – surtout lorsqu'elle relève plus de la nécessité économique que de la loi –, elle suscite des détournements et produit le malaise social, les conflits et, parfois, la désespérance. Tabler sur la seule contrainte peut s'avérer un fort mauvais calcul.

D'un autre côté, les modes de vie contemporains sont beaucoup plus divers qu'il ne semble. Chacun – chaque unité familiale – construit son propre mode de vie, sous contraintes. La similitude de ces dernières pour une même catégorie sociale ou les habitants d'un même territoire peut laisser croire que leurs modes de vie sont semblables. Il ne s'agit que d'une approximation grossière. La thèse de Pauline Silvestre (2017) montre que dans des situations très proches, les habitants d'un territoire de la grande couronne de Paris jouent avec les contraintes et construisent leur mode de vie de façon assez différente, en fonction de leurs systèmes de préférence et de la connaissance du contexte qu'ils ont su acquérir. Même fortement contraint, le mode de vie est l'expression de la spécificité de l'individu ou du groupe familial. L'identité, l'estime de soi – ou son absence – s'y expriment. C'est dire à quel point on ne saurait y intervenir qu'avec infiniment de doigté.

L'adoption d'un ensemble de comportements vertueux en matière d'économie d'énergie – notamment grâce à l'utilisation des outils numériques – constitue un changement dans le mode de vie. Les techniciens partent souvent de l'idée que puisque c'est bon pour eux, les gens vont aimer cela, qu'ils comprendront les informations que leur donne leur compteur Linky et ne fantasmeront pas dessus, qu'ils accepteront avec joie de contraindre leurs déplacements (et donc de moins dépenser sur ce poste), etc.

Vision naïve. Pour la plupart des gens, ce qui compte d'abord, c'est l'équilibre de leur mode de vie : tout élément perturbateur risque de se trouver refusé, même s'il entraîne des économies, et même s'il semble simplifier les choses. Pour qu'on l'accepte, il doit donner l'impression de ne pas perturber, et donc d'entrer dans la logique du mode de vie, laquelle peut s'accrocher à de toutes petites choses (l'heure à laquelle on met le lave-vaisselle en fonctionnement), parce que, derrière, il y a des rituels familiaux, et du sens. Le rôle des médiateurs consiste certainement moins à expliquer les dispositifs qu'à aider les usagers à trouver de quelle manière ils peuvent s'inscrire dans leur logique propre.

Mais la réussite suppose la conviction. On changera d'autant plus ses pratiques et ses usages que l'on trouvera du sens à le faire et, en particulier, que l'avantage économique – qui est un moteur, sous les réserves indiquées ci-dessus – sera relié à un univers de sens.

Cela implique que les imaginaires atteignent le quotidien. C'est le cas, en particulier, de ceux qui portent des représentations de l'intimité. Toute une partie de la consommation s'est largement appuyée sur des éléments d'imaginaire social qui portaient des images de l'intimité. Dans le cas de la transition énergétique, cette formulation n'existe pratiquement pas. Or, il est bien question de consommation. Alors même que la question de l'intime se trouve vigoureusement posée, notamment à travers la circulation des données personnelles et, de façon moins visible, à travers les hésitations dans les pratiques d'exposition de soi – par exemple, sur Facebook (CASILLI, TUBARO et SARABI, 2014) –, le fait qu'il n'y ait pas de récit spécifique qui puisse éclairer les pratiques liées à l'énergie du point de vue de l'intime pose problème.

Bref, il reste à développer les récits qui permettront d'associer la transition énergétique et le numérique dans un même imaginaire qui puisse donner du sens à de nouveaux comportements quotidiens.

Bibliographie

- CASILLI A., TUBARO P. & SARABI Y. (2014), *Against the hypothesis of the end of privacy*, Springer.
- CROZIER M. (1982), *On ne change pas la société par décret*, Le Livre de Poche (édition augmentée).
- RIFKIN J. (2012), *La Troisième Révolution industrielle*, Paris, LLL, traduction CHEMLA F. et P.
- SILVESTRE P. (2017), *Tous contraints ? Les modes de vie et leur territorialisation en grande couronne francilienne*, thèse de doctorat, Université de Paris-Est.

Numérique et transition énergétique

Par Laurent MICHEL

Directeur général de l'énergie et du climat au ministère de la Transition écologique et solidaire
et Guillaume MEHEUT

En charge des sujets de coordination interne et du suivi de la R&D et de l'innovation à la direction générale de l'énergie et du climat, en tant que directeur de cabinet

Les transitions énergétique et numérique sont deux transformations majeures en cours, mais qui sont fondamentalement différentes : la première nous emmène vers un but souhaitable, à savoir une économie et une société bas carbone. La seconde est, quant à elle, un moyen devant être mis au service d'objectifs supérieurs (économiques, sociaux ou environnementaux).

Cependant, la conjugaison de ces deux transitions nous offre des opportunités formidables : le numérique fournit de nouvelles possibilités à tous les acteurs (consommateurs, collectivités, entreprises) par un accès démultiplié aux données et par l'émergence de modèles énergétiques plus interactifs, plus flexibles et plus décentralisés.

De nombreux enjeux doivent être pris en compte pour pouvoir tirer pleinement profit de ce potentiel numérique : maîtriser la consommation énergétique des outils numériques eux-mêmes, assurer la sécurité des systèmes numérisés, créer de nouveaux services à valeur ajoutée et repenser le rôle des acteurs publics et privés.

Les transitions énergétique et numérique sont deux transformations majeures en cours. Cependant, une différence fondamentale les distingue : la transition énergétique nous emmène vers un but souhaitable, à savoir une économie et une société bas carbone. La transition numérique est, quant à elle, un outil, un moyen, qui doit être mis au service d'objectifs supérieurs, que ceux-ci soient économiques, sociaux ou environnementaux.

Les développements récents des technologies, des politiques publiques et des initiatives privées montrent, au plan international autant qu'aux plans national et local, que la conjugaison de ces deux transitions nous offre des opportunités formidables, en particulier à travers la mobilisation et la participation de tous les acteurs : entreprises, État et collectivités territoriales, citoyens et associations. Le numérique fournit ainsi de nouvelles possibilités à tous ces acteurs par un accès démultiplié et en temps réel à une grande masse de données, et par l'émergence de modèles plus interactifs, plus flexibles et plus décentralisés.

De nombreux enjeux doivent être pris en compte pour tirer pleinement profit de ce potentiel numérique : en particulier, maîtriser la consommation énergétique des outils numériques eux-mêmes, assurer la sécurité des systèmes numérisés, créer de nouveaux services à valeur ajoutée et repenser le rôle des acteurs publics et privés dans un contexte numérique.

De nouvelles possibilités numériques pour tous les acteurs des systèmes énergétiques

Les outils numériques s'appuient avant tout sur la production et l'exploitation de données. Ces données peuvent être produites à tous les niveaux des systèmes énergétiques et, par conséquent, sont susceptibles d'intéresser tous les types d'acteur intervenant sur ces systèmes.

La réussite de la transition énergétique passe notamment par une forte amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment ⁽¹⁾, qui nécessite une meilleure maîtrise par les consommateurs de leurs consommations. Cela repose sur une bonne connaissance de ces consommations et des leviers d'action associés, laquelle peut s'appuyer sur des instruments de comptage et d'affichage adaptés aux particuliers comme aux professionnels. La mise en réseau d'objets et d'appareils connectés permet ensuite de contrôler ou de rendre plus flexibles les consommations (par exemple, au moyen d'effacements ou d'une programmation horaire judicieuse tenant compte de l'état du réseau ou d'autres paramètres extérieurs). Bien évidemment, la technologie n'est rien sans

(1) Le secteur résidentiel et tertiaire représentait 45 % de la consommation finale d'énergie en France en 2015 (source chiffres clés de l'énergie - SOeS).

une approche socioéconomique adéquate permettant de prendre en compte les exigences des utilisateurs et de faciliter leurs usages en évitant les pièges de la complexité ou du gadget. La Stratégie nationale de recherche énergétique, adoptée en décembre 2016 ⁽²⁾, souligne l'importance de la compréhension des comportements dans l'accompagnement des « consomm'acteurs » et le danger d'une approche descendante qui viserait à imposer des nouvelles technologies sans en expliquer la valeur ajoutée potentielle et sans en accepter une appropriation différente par chacun de nous.

Pour les producteurs d'énergie, les outils numériques ouvrent un vaste champ d'optimisation de leurs installations, que ce soit par la prévision du productible (par exemple, des outils météorologiques pour anticiper la production d'électricité photovoltaïque ou éolienne), la maintenance prédictive (des analyses statistiques pour prévenir des pannes et augmenter les facteurs de charge moyens), l'insertion dans les réseaux (participation aux services systèmes ou optimisation de la stratégie de vente sur le marché), etc.

Si l'on dépasse la séparation entre ces catégories (consommateurs *versus* producteurs), le numérique accompagne la décentralisation des systèmes *via* l'émergence de l'autoconsommation, y compris collective, pour laquelle un cadre réglementaire est désormais en place, après l'adoption de plusieurs textes d'application de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte et d'une loi *ad hoc* ⁽³⁾. Des outils sont nécessaires pour assurer à la fois la gestion technique en temps réel de portions de réseau, où se met en place l'autoconsommation, et la gestion économique des flux d'énergie associés entre les participants.

Pour les gestionnaires de réseaux, les outils numériques permettent une optimisation globale, à différents horizons temporels, des systèmes dont ils ont la charge (par exemple, le calcul des investissements nécessaires dans les infrastructures, l'intégration des énergies variables et la gestion du foisonnement, l'envoi de signaux aux consommateurs pour maîtriser la demande...). La montée en puissance des énergies renouvelables, qui pose des défis aux réseaux historiquement construits en étoile autour de centres de production de grande taille et fournissant une énergie constante dans le temps, bénéficie ainsi grandement de l'outil numérique.

Pour les pouvoirs publics, la remontée de données de consommation, de production et de transit sur les réseaux fournit une masse d'informations précieuses pour pouvoir évaluer les enjeux, définir une stratégie énergétique et planifier les investissements les plus utiles (rénovation des bâtiments, modernisation des transports, diversification du *mix* énergétique, etc.). La capacité d'exploiter les données disponibles pour construire des modèles prospectifs fiables et tracer des scénarios de transition robustes est ici cruciale.

On voit que tous les acteurs de la transition énergétique sont concernés par la transition numérique et que chacun d'eux a un rôle à jouer pour utiliser à bon escient les nouvelles technologies.

De nombreux défis à relever pour transformer le potentiel numérique en réalité bas carbone

Tout d'abord, la transition numérique pose un véritable défi d'efficacité énergétique. La multiplication des centres de données, l'expansion des réseaux de télécommunications et la distribution massive de terminaux connectés font véritablement exploser la consommation électrique de ce secteur. Il s'agit de maîtriser cette consommation, à la fois par la mise au point d'équipements plus sobres et par une conception intelligente. Ainsi, par exemple, des projets de récupération de la chaleur produite par les centres de données sont en train d'être développés : ils permettent de limiter les dépenses énergétiques pour le refroidissement de ces centres tout en fournissant de la chaleur à des zones résidentielles ou tertiaires. Les industriels du numérique, qui sont de plus en plus conscients des enjeux environnementaux liés à leurs activités, sont par ailleurs parmi les plus actifs dans la recherche de sources d'énergie renouvelables.

En outre, il est indispensable d'assurer dès le départ la sécurité des systèmes et des données pour bâtir une véritable confiance numérique :

- la sécurité des systèmes tout d'abord, c'est-à-dire la cybersécurité des installations (qu'il s'agisse de centrales de production, de centres de gestion ou de lignes de transmission), pour qu'elles ne puissent pas être dégradées ou contrôlées par malveillance à distance. Les infrastructures énergétiques sont d'importance vitale et il ne faut surtout pas les fragiliser par une mise en réseau non sécurisée. La numérisation permet également souvent une plus forte automatisation, qui implique de stricts critères de fiabilité et une réflexion sur le bon niveau de l'interface homme/machine pour ne pas diminuer la résilience et les capacités d'intervention en urgence.
- la sécurité des données ensuite. Celle-ci est fondamentale, et ce que ces données présentent une valeur économique ou qu'elles soient à caractère personnel.

Et, au-delà de la sécurité, se posent les questions relatives aux manières de conjuguer les utilisations de ces données pour développer de nouvelles applications, tout en protégeant les intérêts légitimes des personnes morales ou physiques tant dans leur vie privée que professionnelle. La Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) est d'ailleurs très impliquée dans la définition du cadre réglementaire relatif aux données de consommation d'énergie, qui peuvent, par exemple, donner beaucoup d'indications sur le mode de vie d'un foyer.

Enfin, et surtout, pour tirer pleinement profit du numérique, il est nécessaire de créer de nouveaux services apportant une réelle valeur ajoutée aux consommateurs d'énergie. Les outils domotiques existent depuis de nombreuses

(2) <http://www.developpement-durable.gouv.fr/recherche-et-developpement-lenergie>

(3) Ordonnance n°2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité ; loi n°2017-227 du 24 février 2017, décret n°2017-676 du 28 avril 2017.

années et le simple fait de les mettre en réseau grâce à la dernière génération d'objets connectés ne suffira pas (à apporter les économies d'énergie tant attendues. De même, les « *Big Data* » et autres « *smart grids* » résonnent parfois à nos oreilles comme des incantations magiques, mais le travail à réaliser pour fournir des solutions complètes, performantes et réellement utilisables de gestion intelligente en temps réel des réseaux est considérable.

De nombreux projets de recherche et de démonstration sont ainsi soutenus par l'État, notamment à travers le programme des Investissements d'avenir (40 projets financés à hauteur de 120 millions d'euros environ par l'Ademe, depuis 2011) pour relever ce défi. Ces projets visent notamment des essais d'ilotage de portions de réseau pour se protéger localement d'un problème sur le réseau (projet Nice Grid), des tests de couplage entre installations de production d'énergies renouvelables et moyens de stockage pour alimenter des zones d'activité (projet Smart ZAE, à Toulouse), la mise au point d'outils de gestion pour des opérations d'autoconsommation collective, par exemple à base de *blockchain* (projet Digisol, dans les Pyrénées-Orientales), etc. Des expérimentations à plus grande échelle sont désormais en route avec la désignation de territoires régionaux pilotes (projet Smile en Bretagne-Pays de Loire et projet Flexgrid en PACA), qui sont en train de présenter leurs premiers projets opérationnels.

Dans ce contexte, les acteurs publics ont également un rôle d'animation et de mobilisation à jouer. L'ouverture des données peut permettre de libérer l'innovation et aussi de donner aux acteurs les outils de connaissance pour leur permettre d'orienter leurs actions. C'est ce qui motive, par exemple, l'organisation d'« *hackathons* ⁽⁴⁾ », comme celui mis en place par le ministère de l'Environnement en mai 2016 ⁽⁵⁾ sur l'utilisation des données produites par les compteurs connectés, dans le cadre de l'initiative « *Greentech* ». L'« État régulateur » s'accompagne ainsi d'un « État plateforme », qui met à disposition des données (ou pousse les acteurs économiques à le faire) afin de mobiliser la créativité et les compétences de tous. En application de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, des décrets ont été publiés ⁽⁶⁾, à l'été 2016, qui imposent la mise de données relatives à l'énergie à la disposition des personnes publiques. L'ouverture des données a également été largement renforcée par la loi pour une République numérique.

Un secteur clé : la révolution numérique au service de la transition énergétique dans les transports

Le secteur des transports, premier émetteur de gaz à effet de serre au niveau national (29 % du total en 2014), est emblématique de transformations apportées par le numérique susceptibles, dans le même temps, de constituer des opportunités majeures pour la transition énergétique.

L'accès à de nouvelles masses de données sur les flux de personnes et de marchandises et une vision plus interconnectée de l'offre de transports devraient permettre de faciliter une planification intelligente des investissements,

dans une approche intégrée du développement des territoires tant urbains que ruraux. Les collectivités vont par exemple pouvoir proposer de nouveaux services de mobilité s'appuyant davantage sur l'intermodalité et sur une information des usagers, en temps réel et sans coupure. Les entreprises vont pouvoir optimiser leurs chaînes logistiques. Les consommateurs vont plus facilement recourir à des solutions ayant une moindre empreinte environnementale telles que le covoiturage ou le partage de véhicules, et ce grâce à une mise en réseau efficace (plateformes Blablacar, IDVroom, Drivy...). L'arrivée des véhicules connectés et autonomes ouvre également un vaste champ à exploiter, avec des perspectives d'optimisation de la conduite. Sur tous ces points, des réductions des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques sont à notre portée, mais cela nécessite encore des efforts très importants.

L'État, à travers la Stratégie nationale de développement de la mobilité propre (publiée en octobre 2016 ⁽⁷⁾), soutient ces évolutions. On retrouve ici tous les enjeux que nous avons évoqués précédemment. Les autorités publiques ont un rôle crucial à jouer pour libérer les données, faire communiquer entre eux tous les modes de transport (ce qui implique notamment des enjeux concurrentiels à gérer).

Un besoin de réglementation apparaît par ailleurs pour garantir un développement sécurisé des nouveaux services tels que les véhicules connectés (et bientôt autonomes). Nous sommes entrés, sur ce sujet, dans une phase d'expérimentation sur le terrain et les acteurs français sont en pointe : l'Institut pour la transition énergétique VeDeCom ⁽⁸⁾, qui regroupe des acteurs publics et privés autour d'un programme de R&D financé par le programme des Investissements d'avenir, les PME Navya et EasyMile, qui testent des navettes sans chauffeur à Lyon et à Paris, etc. Le cadre réglementaire en termes d'évolution du code de la route, de définition des responsabilités, d'encadrement technique de divers enjeux comme la cyber-sécurité, doit vite évoluer pour donner de la lisibilité aux apporteurs de solutions comme aux utilisateurs.

La mobilité électrique soulève en outre des défis technologiques, du fait des appels de puissance sur les réseaux. Mais elle peut fournir une brique essentielle pour le bon

(4) Événement au cours duquel des développeurs volontaires se réunissent pour se livrer à la programmation informatique collaborative et inventer de nouvelles applications, par exemple à partir d'une banque de données mise à disposition. C'est un processus créatif fréquemment utilisé dans le domaine de l'innovation numérique.

(5) <https://www.data.gouv.fr/fr/posts/compteurconnect-les-donnees-du-hackathon-sur-la-consommation-energetique/>

(6) Décret n°2016-973 du 18 juillet 2016 relatif à la mise à disposition des personnes publiques de données relatives au transport, à la distribution et à la production d'électricité, de gaz naturel et de biométhane, de produits pétroliers et de chaleur et de froid ; décret n°2016-972 du 18 juillet 2016 relatif à la confidentialité des informations détenues par les opérateurs gaziers et par les gestionnaires des réseaux publics de transport ou de distribution d'électricité.

(7) http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/Strategie_developpement_mobilite_propre.pdf

(8) <http://www.vedecom.fr>

fonctionnement de ces réseaux et appuyer le déploiement d'une gestion plus décentralisée, sous réserve d'un pilotage intelligent de la charge (voire de l'utilisation des batteries des véhicules pour injecter dans le réseau de l'électricité stockée). Là encore, des projets de démonstration sont en cours, avec un soutien fort du programme d'Investissements d'avenir, pour mettre au point les algorithmes et les protocoles de communication nécessaires (à l'instar, par exemple, du projet BienVEnu d'Enedis pour la gestion optimisée de recharge des véhicules électriques dans le résidentiel collectif).

Conclusion

En conclusion, on voit que les promesses (et, déjà, les réalisations) sont nombreuses. Tout comme le sont les

prérequis à résoudre et les obstacles à franchir. La mobilisation de tous les acteurs dans les prochaines années permettra de concilier la révolution numérique et la transition énergétique pour transformer l'essai en un succès environnemental, économique et social. Il est donc important de poursuivre l'effort d'innovation technologique, systémique et sociétale en déployant, en parallèle, un cadre réglementaire et réglementaire à la fois adapté et facilitateur et une démarche d'accompagnement de l'expérimentation de ces nouveaux outils, avant leur déploiement. Le travail en commun d'univers nombreux et parfois fortement cloisonnés (les mondes de l'énergie, du numérique, des infrastructures de transport, de l'automobile, l'État, les collectivités locales, les assureurs, la société civile...) est plus que jamais nécessaire pour y parvenir.

Enjeux et opportunités de l'ouverture des données publiques en matière d'énergie

Par Sylvain MOREAU

Chef du Service de la donnée et des études statistiques (SDES), Commissariat général du Développement durable (CGDD), ministère de la Transition écologique et solidaire

Conséquence du développement d'Internet, les gigantesques fichiers de données produits par l'activité des géants du secteur et issus, en général, des modes de consommation des ménages et des entreprises, représentent des bases d'étude d'une extrême richesse. Leur usage dans le cadre de la statistique publique n'est pas fondamentalement différent du travail que celle-ci a l'habitude de réaliser à partir de fichiers administratifs, si ce n'est que ces données permettent, souvent, de disposer d'une richesse d'informations géographiques et temporelles qui permet d'élaborer des indicateurs plus nombreux et plus détaillés. Suite à la mise en œuvre de la loi Énergie, les acteurs de la statistique publique ont un rôle essentiel à jouer en matière de mise à disposition des informations transmises par les producteurs et les distributeurs. Les données déjà disponibles affichent un niveau de détail géographique jamais atteint jusqu'ici. Les évolutions d'ores et déjà prévues auront un impact important sur les systèmes d'information statistiques portant sur l'énergie et sur les modes de travail de la statistique publique.

Dans le domaine des sciences de l'information, l'expression *Big Data* (ou données massives) a pris ces dernières années une importance croissante. En premier lieu, c'est l'augmentation importante du volume des données produites par les géants de l'Internet, mais aussi par certaines disciplines scientifiques (la génomique et l'astronomie, en particulier) qui a favorisé ce phénomène. Les progrès intervenus dans les techniques de stockage et dans le traitement de données volumineuses de natures variées (notamment en format texte ou image), souvent produites en flux continu (d'où la dénomination des « trois V » (pour Volume, Variété et Vitesse) qui est souvent citée et mise en avant) sont à l'origine de gigantesques gisements de données. Leur existence même a permis la mise en œuvre d'outils et de méthodes spécifiques (par exemple, de certains algorithmes de recommandation pour des sites de vente en ligne), mais elle a aussi donné la possibilité de disposer d'une information extrêmement détaillée, permettant de répondre à des besoins d'information fine, notamment au niveau géographique, qui n'était, tout simplement, pas satisfaits jusqu'ici.

Au final, le *Big Data* recouvre des réalités très différentes : à la fois la mise à disposition de sources de données qui n'existaient pas jusqu'ici et l'apparition de méthodes de

gestion et d'analyse de ces données, dont le format peut être non standard.

La statistique publique est naturellement concernée par l'émergence de ces nouvelles sources. Certains instituts nationaux de statistiques (INS) (Istat et CBS, en particulier) ont développé assez tôt une stratégie explicite d'utilisation des *Big Data*, se lançant dans des expérimentations. Plusieurs groupes de travail ont été créés au niveau international (en particulier par Eurostat et l'Unece, mais aussi par l'ONU) pour définir une position commune de la statistique publique sur l'exploitation des nouvelles sources de données, définir des initiatives prioritaires et mutualiser les investissements. À l'Institut national des statistiques et des études économiques (INSEE), le groupe « nouvelles sources » s'est interrogé, dans le cadre des réflexions menées autour d'INSEE 2025, sur le positionnement de la statistique publique sur ces questions.

Dès 2011, l'INSEE (à l'instar de certains instituts statistiques à l'étranger) a lancé un projet intitulé « données de caisse », dont l'objectif était d'intégrer les données issues de la grande distribution dans l'indice des prix à la consommation. Ce projet a permis de mettre en lumière certaines questions à instruire pour pouvoir exploiter ce type de données.

La première de ces questions est juridique : comment pérenniser l'accès de la statistique publique à ces données ? Quand les premiers travaux ont été lancés, il n'existait pas de cadre juridique garantissant cet accès. L'intégration d'un article spécifique dans le projet de loi pour une République numérique a depuis permis d'apporter une réponse à cette question.

La deuxième question est d'ordre technique : il faut garantir la gestion des flux et le stockage de ces données de très grands volumes, ce qui nécessite une infrastructure adaptée. Pour ce faire, l'INSEE a développé une plateforme de stockage dédiée à ce type d'usage.

Les particularités des Big Data

Quand on parle de *Big Data*, on pense, en premier lieu, aux données de gestion détenues par des opérateurs privés, dont certaines sont considérées comme étant susceptibles d'être utilisées par la statistique publique (facturations de la grande distribution déjà exploitées par l'INSEE, compteurs électriques intelligents, facturations de la téléphonie mobile...). Les problématiques posées par leur utilisation sont, par certains aspects, assez proches de celles des données administratives, que la statistique publique exploite depuis longtemps : il s'agit de la qualité et de la représentativité des données ; de l'adéquation entre les données dont on dispose et le phénomène que l'on veut mesurer ; de la pérennité de la source et du manque de maîtrise sur les évolutions des formats et des contenus ; et, enfin, de la taille en elle-même de ces gisements de données.

Il s'agit là de problématiques familières à la statistique publique sur lesquelles l'INSEE et les autres services statistiques ministériels (SSM) ont développé des expertises depuis déjà plusieurs décennies.

Ces données massives présentent néanmoins un certain nombre de spécificités que l'on ne retrouve pas chez les sources administratives :

- En premier lieu, leur accessibilité : propriétés d'opérateurs privés, elles font souvent l'objet d'une valorisation économique par ces derniers. Le vote de la loi numérique a donné quelques facilités à l'INSEE et aux SSM pour leur permettre d'accéder à ces gisements de données, mais cet accès est très encadré. Il s'agit de répondre à des besoins d'enquêtes statistiques obligatoires, et ce, uniquement s'il est démontré que ce mode de collecte est adapté aux besoins de l'enquête et qu'il présente, par rapport à d'autres modes de collecte, des avantages en termes de coût pour le service statistique public ou les personnes enquêtées, et/ou de qualité des données produites. Enfin, les renseignements extraits des bases de données ne peuvent être utilisés à d'autres fins que la réalisation de l'enquête statistique spécifique pour laquelle l'accès aux dites bases a été donné.
- La nature même de ces données, qui les rend souvent peu maniables. Pour un certain nombre d'entre elles, elles sont étroitement liées aux comportements des ménages, puisqu'elles en sont directement issues, et leur existence même peut être très corrélée au phénomène que l'on veut observer, qui est de ce fait difficile à quantifier.

Elles peuvent donc servir utilement pour qualifier certains modes de consommation, mais elles ne sont que de peu d'utilité pour qualifier et quantifier le pourcentage des ménages touchés par ces phénomènes. Ainsi, il peut être facile en ayant accès aux bases de gestion des sites de covoiturage de disposer de données concernant l'évolution de ce phénomène, les parcours effectués, voire sur certains profils d'utilisateur. En revanche, ce type de données ne donnera pas d'information sur le poids relatif du covoiturage dans les modes de transports globaux ni sur les motivations des déplacements effectués.

- Le caractère sensible de ces données : il s'agit souvent de données personnelles susceptibles de mettre en lumière des comportements individuels, elles sont donc *a priori* sensibles. La possibilité de croiser de manière quasi universelle des volumes considérables de données pour faire émerger de nouveaux services est d'ores et déjà largement utilisée à des fins de profilage, notamment en matière commerciale. La Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL), très sensible à ces problématiques, a fait évoluer sa doctrine et ses modes de travail de façon à permettre une bonne protection de l'individu, sans pour autant mettre de frein à l'innovation.

L'intérêt du travail statistique sur les Big Data

Un des premiers intérêts que la statistique publique peut trouver à travailler sur ce type de gisement de données réside dans l'amélioration et l'enrichissement de la production statistique actuelle.

Il est ainsi souvent mis en avant la possibilité de réduire les délais de publication de certains indicateurs, ce qui constitue un enjeu important pour la statistique publique. L'utilisation de données produites en continu et immédiatement accessibles semble *a priori* un moyen naturel pour réduire les délais de production et de mise à disposition de certains indicateurs : les compteurs intelligents pourraient ainsi produire des estimations plus fréquentes de la consommation d'énergie (électricité, gaz...).

De son côté, Orange promet, à travers son offre commerciale « FluxVision », de convertir, chaque minute, 4 millions de données mobiles en indicateurs statistiques pour mesurer la fréquentation d'une zone géographique et les déplacements des populations.

La masse des données disponibles peut également permettre de produire des indicateurs présentant un niveau de granularité plus fin (sur des sous-catégories ou des sous-populations : les données de caisse, par exemple, peuvent permettre de produire de manière plus systématique qu'actuellement des prix moyens par produit, ou des indices de prix régionaux), ou une plus grande précision, sans pour autant alourdir la charge de l'enquête (par exemple, estimation des temps de transport par mode à partir des données de téléphonie mobile). Elle permet en général de disposer d'informations plus complètes, voire exhaustives, et donc de mettre potentiellement à disposition une information beaucoup plus détaillée, notamment au niveau géographique, et donc plus pertinente pour des acteurs locaux.



Smart Electric Lyon, une expérimentation à grande échelle d'une gamme de produits et de services nouveaux compatibles avec des « smart grids ».

« Les avancées technologiques permettent déjà ou vont bientôt permettre de disposer d'informations sur les consommations en temps réel, et ce avec un niveau de détail inégalé jusqu'ici. »

Ces nouvelles sources de données pourraient en outre réduire la charge d'enquêtes, faire baisser les coûts de collecte et générer ainsi des économies.

Sur ce dernier point, la situation est bien évidemment plus complexe. La réduction de la charge d'enquêtes doit être mise en regard du coût des investissements nécessaires pour assurer le traitement de données massives, qui, par nature, sont moins faciles à appréhender. Ainsi, l'expérimentation de l'utilisation des données de caisse (dans le cas français) a nécessité le développement d'une infrastructure informatique adaptée au traitement de flux de données très volumineuses et l'achat de catalogues permettant de traiter ces données. Un bilan récemment publié par *Statistics Norway* montre que l'exploitation de ces données a effectivement réduit la charge d'enquêtes, mais qu'elle a aussi conduit à une augmentation du nombre des ressources internes allouées à la production de l'indice des prix.

Cette augmentation s'explique non seulement par l'intégration pour la production de cet indice de données plus complexes, mais également par un « effet qualité » se traduisant par la production d'indicateurs potentiellement plus nombreux. Comme cela a été évoqué plus haut, l'information disponible est structurellement plus riche et

plus complète, elle est donc susceptible de valorisations beaucoup plus importantes.

Pour un certain nombre de problématiques, l'utilisation de ce type de gisement de données pourrait, à terme, modifier profondément le système d'observation. Compléter l'exploitation de ces sources très détaillées par quelques enquêtes de cadrage pourrait être une solution alternative à des enquêtes régulières, et cela pourrait permettre de continuer à mettre à disposition la même information que celle que nous produisons actuellement, tout en élargissant le spectre des données disponibles, notamment à l'attention des acteurs locaux.

L'énergie, une bonne candidate pour ce type de travail

L'énergie est un domaine dans lequel l'exploitation des *Big Data* est sans doute riche de potentialités. Certaines de celles-ci sont déjà mises en œuvre.

L'énergie est en effet un secteur d'activité qui a subi de profondes transformations, ces dernières années. Les acteurs ont beaucoup changé, leur nombre s'est accru et ils se sont diversifiés. Les avancées technologiques permettent déjà ou vont bientôt permettre de disposer d'informations sur les consommations en temps réel, et ce avec un niveau de

détail inégalé jusqu'ici. Enfin, le principe d'une ouverture des données collectées par les gestionnaires de réseaux d'énergie qu'a posé la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte a, en l'espace d'une année seulement, complètement changé la donne.

En effet, cette loi fait obligation aux transporteurs et aux gestionnaires de réseau de communiquer à l'administration les données liées à la consommation totale annuelle d'électricité, de gaz, d'hydrocarbures et de chaleur, par secteur d'activité et à l'échelle des quartiers. Celle-ci doit les rendre publiques, une fois qu'auront été traitées les questions de secret, celle principalement de la protection des données personnelles. L'objectif premier est de faciliter l'exercice par les collectivités locales de leurs nouvelles compétences en matière d'énergie (élaboration des Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires – SRADETT – et des plans Climat-air-énergie territoriaux – PCAET), notamment) et d'inciter les consommateurs à maîtriser leurs consommations. C'est le Service statistique du ministère de la Transition écologique et solidaire, qui, étant le point focal de cette mise à disposition, a la responsabilité de cette rediffusion de données en direction des acteurs locaux.

Ces données sont disponibles sur le site du Service statistique du ministère précité depuis la fin de l'année 2016 sous un format ouvert aisément réutilisable et exploitable. À un horizon de deux ans, ces données seront disponibles à l'échelle des bâtiments.

Cette offre de données en *open data* constitue *de facto* un véritable levier en termes d'usages nouveaux et de services énergétiques.

À terme, elle va complètement bouleverser les processus de production des données statistiques relatives à l'énergie.

Côté statistiques, on suit actuellement la consommation finale d'énergie des secteurs pris dans leur ensemble, mais aussi par grand secteur économique (agriculture, industrie, transport, résidentiel, tertiaire). La décomposition sectorielle de la consommation d'énergie se fonde sur différentes sources statistiques collectées et traitées par le SSM du ministère chargé de l'Environnement (le SDES, Service de la donnée et des études statistiques), qui les enrichit à partir d'enquêtes réalisées par l'INSEE ou d'autres services statistiques ministériels, notamment celui du ministère de l'Agriculture. Il dispose aussi, s'agissant de la répartition par usages et de la consommation d'énergie dans le résidentiel et le tertiaire (selon la nature du logement), des données du CEREN (le Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie).

L'ensemble de ces résultats est établi principalement au niveau national. Des travaux de régionalisation ont également été réalisés dans le passé. Pour certains secteurs économiques, l'élaboration de statistiques régionales peut s'appuyer sur des enquêtes *ad hoc*. Pour d'autres, il s'agit d'estimations ou de calculs par soldes (c'est notamment le cas du résidentiel pour lequel aucune source statistique présentant un degré de précision suffisant n'est disponible au niveau régional). L'expérience prouve que ces résultats peuvent être fragiles et soulever pas mal de

questions. Or, une des fortes demandes adressées aux services statistiques concerne justement la mise à disposition de données fiables au niveau local.

L'accès aux données de consommation à des niveaux géographiques extrêmement fins permet d'apporter une première réponse. Et, typiquement, les difficultés (que nous avons pointées au début de cet article) inhérentes à certaines données *Big Data* ne concernent pas ces types de données. En effet, elles sont exhaustives, ne présentent pas de biais de sélection et sont accessibles de par la loi.

Ceci étant, elles ne permettent pas de répondre à l'intégralité des questions qui sont posées. Il n'est, par exemple, pas possible de connaître les usages. Mais l'on peut imaginer, quand les données seront effectivement disponibles au niveau des bâtiments, qu'il sera alors possible de disposer, par recoupement avec d'autres sources (par exemple, le fichier SIREN), d'une description très fine des consommations d'énergie par secteur d'activité. Cela, en revanche, n'exonérera pas de la nécessité de disposer d'autres outils statistiques (enquêtes, sources administratives, modélisations) qui permettront d'enrichir ces données et de compléter l'information déjà disponible.

Le déploiement des « compteurs intelligents » à la fois pour l'électricité et le gaz pourrait aussi, à terme, ouvrir des perspectives intéressantes pour le suivi de la consommation d'énergie, pouvant même aller jusqu'aux usages, qui pourraient être modélisés pour les ménages. Dans le cas de l'industrie, le niveau de nomenclature pourrait être affiné. Un suivi infra-annuel serait possible à des niveaux géographiques extrêmement fins. Enfin, l'étude de la précarité énergétique pourrait également être approfondie.

Le positionnement des SSM dans la mise à disposition de ces données est un peu différent du positionnement traditionnel d'un service statistique national. En effet, la statistique publique met à disposition des données qui sont considérées comme des données de référence, dont la fiabilité est avérée. Or, dans le cadre de la mise à disposition des données de consommation d'énergie, le temps nécessaire entre la collecte desdites données auprès des opérateurs et leur mise à disposition n'a pas permis de fiabiliser ces données. Seules les erreurs les plus flagrantes, telles que celles constatées dans les unités, ont fait l'objet d'un traitement spécifique. Il est quasi certain qu'il existe des erreurs de saisie : indétectables au niveau national, elles peuvent néanmoins avoir un impact important à l'échelle territoriale. Cela nécessiterait sans doute une qualification de la donnée diffusée, au minimum à un niveau simple (de type donnée « examinée », ou « non examinée »).

Mais si ce type de travail est amené se généraliser, il sera alors sans doute nécessaire de réfléchir à la mise en place de réseaux permettant de fiabiliser les données, avec, par exemple, une décentralisation du travail de correction, dans un premier temps, à l'échelon des directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), puis, éventuellement, auprès d'autres acteurs locaux, avec un retour formalisé des données auprès des producteurs de celles-ci, ce qui nécessitera d'inventer des règles permettant un travail collaboratif autour de ces données.

La baguette numérique de la Fée Électricité

Par Patrick MORILHAT

EDF, direction de la R&D, responsable du programme de recherche sur l'amélioration des performances des centrales nucléaires

et Thomas BLADIER

EDF, direction de la R&D, responsable du programme de recherche et innovation sur la relation client, le logement connecté (*smart home*) et le numérique pour les activités de commercialisation et de services énergétiques

Pour garantir durablement la fourniture d'une énergie bas carbone, sûre et compétitive, offrir les services qu'attendent ses clients et conforter sa place dans le peloton de tête des leaders mondiaux de l'énergie, EDF accélère sa transformation numérique. Numérisation des processus internes, digitalisation de la relation client, développement de réseaux intelligents, recours à la réalité virtuelle et à l'intelligence artificielle pour simplifier la conception et l'exploitation des actifs industriels de production : ce sont là autant d'innovations qui permettent des gains de productivité, mais qui changent aussi durablement la façon d'exercer les métiers de l'entreprise et, donc, les compétences nécessaires à leur réalisation.

Quels gains attendre de la transformation numérique en cours à EDF ? Quelles questions soulève-t-elle ? Comment associer au plus tôt les acteurs impliqués dans cette transformation à tous les niveaux ? Quelles sont les clés de succès, et les facteurs de risque ? Autant de questions que nous aborderons dans cet article.

Le numérique, un levier fondamental de la compétitivité de la filière nucléaire

La quatrième Révolution industrielle, fondée sur l'usage massif des technologies numériques, est à l'œuvre dans tous les secteurs d'activité. Au-delà des formidables progrès technologiques que l'on observe tous les jours, la transformation numérique est un levier essentiel de compétitivité pour les entreprises. Mais c'est également un formidable vecteur de rupture pour les organisations, les métiers et l'ensemble de la chaîne de valeur.

Il est donc naturel que l'industrie nucléaire française – et, en premier lieu, son chef de file EDF – soit elle aussi engagée dans cette transformation numérique. L'objectif est bien sûr de gagner en compétitivité dans l'exploitation et la rénovation du parc des centrales existantes ou dans les projets à l'international, mais c'est aussi d'assurer une meilleure coopération entre les partenaires de la filière nucléaire française, qui est la troisième filière industrielle nationale après l'aéronautique et l'automobile, avec 2 500 entreprises.

Pour EDF, la transition numérique n'est pas un sujet totalement neuf. L'outil numérique y est largement utilisé depuis les années 1980 pour la simulation et la modélisation

des phénomènes physiques, ou le pilotage des procédés. Rappelons simplement qu'avec plusieurs industriels de la filière française, EDF a conçu de manière totalement numérique, puis construit, autour des années 2000, deux centrales nucléaires, celles de Chooz et de Civaux, avec des salles de commande entièrement informatisées, ce qui a constitué une première mondiale pour l'époque.

La révolution numérique en cours revêt cependant trois dimensions nouvelles : l'accélération récente des progrès technologiques, son extension à tout le cycle de vie de l'installation et l'importance de la notion de continuité numérique pour garantir que donneurs d'ordres et fournisseurs avancent au même pas dans la recherche de gains de productivité.

La première dimension est technique : automatisation des procédés et basculement des systèmes analogiques vers les systèmes numériques, développement de l'Internet des objets et donc augmentation des flux de données, fortes avancées en intelligence artificielle, que ce soit en matière de puissance des algorithmes ou d'augmentation des capacités de calcul.

Dans ce domaine, un exemple d'innovation en cours concerne les systèmes de surveillance pour la main-

tenance prédictive des matériels. Des systèmes dits « *e-monitoring* » ont été développés au début des années 2000 et déployés avec succès sur les parcs nucléaire, thermique et hydraulique d'EDF. Le besoin est aujourd'hui d'étendre le champ de la surveillance à l'ensemble des procédés et d'instrumenter à bas coût, donc, si possible, sans fil, des matériels « orphelins » jusque-là non instrumentés, en particulier dans la partie secondaire des centrales (échangeurs, vannes...). Les progrès des technologies *Big Data* et des méthodes d'apprentissage permettent désormais d'envisager des solutions plus agiles, moins chères et moins dépendantes des technologies en place. Ces solutions facilitent les croisements de données hétérogènes, comme celui des données numériques fournies par le procédé et des données textuelles issues de rapports de maintenance.

La deuxième dimension de la révolution numérique en cours est temporelle et couvre le cycle de vie de l'installation. Les applications numériques concernent la conception des réacteurs (avec des outils de simulation numérique), l'exploitation et la maintenance des installations (via des outils d'imagerie virtuelle, de réalité augmentée et d'intelligence artificielle) et, enfin, la déconstruction (avec le recours à des opérations robotisées).

Dans ce dernier domaine, on peut citer l'usage de la réalité virtuelle et des technologies immersives. Le service de R&D d'EDF a développé un outil de visite virtuelle d'un bâtiment réacteur complet à partir de photos panoramiques 360° à haute définition, de scans laser 3D, de données CAO et de plans. Cet outil est utilisé depuis un an pour préparer les chantiers du « grand carénage » des centrales françaises. Grâce à une technologie empruntée à l'univers des jeux vidéo, l'utilisateur se déplace virtuellement à l'intérieur du bâtiment réacteur pour préparer son intervention (par exemple, déterminer la hauteur optimale d'un échafaudage ou vérifier au décimètre près l'espace nécessaire pour réaliser l'intervention). Les technologies de « *deep learning* » sont également utilisées pour identifier automatiquement dans une masse de photos des objets ou isoler des repères d'identification de matériels.

La troisième dimension est organisationnelle et concerne la relation entre EDF et ses partenaires. Si, en phase d'exploitation, l'essentiel de la valeur ajoutée est créé par EDF, il n'en va pas de même pendant les phases d'arrêt périodique des installations, durant lesquelles la valeur est créée principalement par les prestataires de maintenance. Les gains de productivité apportés par le numérique doivent donc être présents sur l'ensemble de la chaîne donneur d'ordres/fournisseur de rang 1/fournisseur de rang 2.

Cette continuité numérique dans un fonctionnement en entreprise étendue nécessite un accord sur le partage et la propriété des données, des outils collaboratifs et interopérables, l'adoption de standards communs pour nommer des objets ou des concepts identiques, etc. Pour avancer sur le sujet, EDF a lancé un « club de la transition numérique » pour réfléchir à la création d'une plateforme numérique commune avec ses partenaires, à l'instar de la

plateforme BoostAerospace qui existe déjà dans le secteur aéronautique. L'objectif est de permettre aux acteurs de la filière nucléaire de collaborer sur les mêmes projets en partageant la documentation, les modèles, etc., tout en assurant la traçabilité des exigences et des données.

Un exemple de travaux menés en « continuité numérique » porte sur l'utilisation de méthodes d'ingénierie système couplées aux progrès de la simulation pour concevoir numériquement les systèmes de conduite des centrales et prototyper rapidement de nouvelles salles de commande des réacteurs. Des travaux de R&D ont fait l'objet d'un projet financé par la direction générale des entreprises (DGE), qui a réuni pendant 4 ans EDF, AREVA et le CEA, mais aussi d'autres partenaires de la filière nucléaire, comme ATOS, RRCN, ESTEREL/ANSYS ou bien encore ALSTOM/GE. Ce projet a donné naissance en 2014 au FabLab Connexion. Les outils élaborés permettent de réduire considérablement la durée des études et seront utilisés pour des projets de conception de nouveaux réacteurs ou de modification des réacteurs existants.

Toutes ces innovations de R&D ont pour vocation essentielle de préparer le futur pour simplifier la conception et l'exploitation des centrales nucléaires. Mais bien d'autres innovations sont également développées directement par l'ingénierie ou l'exploitant.

C'est ainsi que les équipes d'ingénierie d'EDF multiplient les échanges pour promouvoir l'entreprise étendue dans la conception des nouveaux réacteurs autour d'une même infrastructure de type *Plant Life Management* (PLM) : les données de référence des équipements sont gérées sous forme numérique et non plus sous la forme de documents papier, et toutes les modifications de ces données sont automatiquement redirigées vers les services utilisant celles-ci dans leurs études. Ainsi, pour la construction de l'EPR de Flamanville (dans la Manche), la gestion du chantier a été numérisée depuis 2015 : par exemple, tous les essais d'ensemble sont désormais digitalisés, ce qui permet de respecter le calendrier de démarrage.

Du côté des équipes d'exploitation, le digital occupe également une place de plus en plus importante. Huit cents applications numériques ont ainsi été développées pour la production nucléaire – rien qu'en 2016 ! Beaucoup d'innovations simplifient non seulement la vie des intervenants sur le terrain, mais aussi celle des managers : saisie numérique des informations de rondes, mise en place de packs métiers digitaux (documentation et procédures informatisées), portails d'information métier permettant de décloisonner les divers systèmes d'information...

Jusqu'où est-il possible (ou souhaitable) d'aller, en matière de numérisation ? Les questions de propriété et de gouvernance des données, les aspects liés à la cybersécurité, l'appréciation exacte de la valeur ajoutée des innovations numériques au regard de leurs coûts (qui sont souvent sous-estimés) ou encore l'impact de la numérisation sur l'évolution des compétences et des métiers restent autant de défis à relever pour EDF et l'ensemble de la filière nucléaire.

Le numérique, une nouvelle ère pour le fournisseur et le distributeur d'énergie !

Les « *smart grids* », ou la transformation numérique des réseaux d'électricité

Le numérique constitue aussi une formidable opportunité de transformation des réseaux électriques. C'est la dynamique des « *smart grids* », qui a conduit depuis plusieurs années à déployer des technologies télécom et informatiques pour piloter, grâce au numérique, les réseaux de transport et de distribution de l'électricité. Ces technologies ont été mises au point grâce à des démonstrateurs à grande échelle, qui ont permis de faire converger les multiples acteurs de l'écosystème (gestionnaires de réseaux de distribution, commercialisateurs d'électricité, équipementiers...) sur l'adoption de normes communes.

Grâce à cette transformation, les réseaux d'électricité seront plus résilients aux aléas et plus flexibles. Ils pourront ainsi accompagner la transition énergétique : les réseaux « intelligents » peuvent, par exemple, s'adapter au caractère intermittent des sources d'énergie renouvelables (éoliennes, parcs de production photovoltaïque...) ou moduler la demande d'électricité à un instant donné pour tenir compte du prix instantané de l'électricité ou de son contenu en CO₂.

Pour les clients particuliers, l'évolution la plus visible est le déploiement du compteur communicant Linky. Celui-ci permet un suivi beaucoup plus fin de la consommation d'électricité : nos concitoyens ont ainsi accès à une information plus précise à même de les aider à maîtriser leur consommation d'énergie. Linky permet également de construire des offres tarifaires modulées dans le temps, au-delà des simples heures pleines et heures creuses, pour s'adapter aux profils de consommation des clients et ainsi mieux encourager l'adoption de comportements vertueux. Moins visibles du grand public, des compteurs communicants sont aussi déployés chez des entreprises clientes qui n'en avaient pas bénéficiés jusqu'ici.

Aux compétences classiques mobilisées dans les réseaux d'électricité (électrotechnique, ingénierie...) s'ajoutent donc des compétences télécom et informatiques. Dans ces domaines, les évolutions à venir sont nombreuses, comme le foisonnement de solutions télécom pouvant s'appliquer au « *machine to machine* » ou à la supervision et à la conduite de réseaux, ou encore les solutions constituant une réponse aux défis croissants liés à la cybersécurité.

L'utilisation des *data* améliore considérablement les performances des fournisseurs d'énergie

La transition numérique se caractérise par une abondance de données : aux données des compteurs communicants s'ajoutent les données générées par les processus de l'entreprise, mais aussi les données mises à disposition par des tiers (*Open Data*) ou générées par des objets communicants. C'est, pour le fournisseur d'énergie, un moyen d'optimiser ses processus internes et de proposer de meilleurs services à ses clients.

L'*Open Data* a, par exemple, été utilisé pour améliorer la prévision de la saisonnalité des appels téléphoniques des clients. EDF répond en effet chaque année à plus de 30 millions d'appels, avec de très fortes fluctuations quotidiennes. L'observation des requêtes formulées sur les moteurs de recherche Internet portant sur le thème de l'immobilier lui a permis d'anticiper les pics d'appels générés par les déménagements, et donc de mieux y répondre.

Grâce au traitement des données, EDF aide également ses clients à mieux maîtriser leur consommation. EDF a créé des sites Internet qui permettent aux clients particuliers, mais aussi aux collectivités ou aux entreprises, de suivre et de comprendre leur consommation d'électricité ou de gaz : quelle est la saisonnalité de leur consommation, quels sont leurs usages les plus consommateurs, comment moins consommer ? De plus en plus, ces conseils s'enrichissent des données générées par les objets connectés que les clients peuvent interfacer avec ces services.

Les compétences mobilisées par ces travaux sont très variées : les *data scientists* alliant le traitement des données (statistiques...) à la capacité de les extraire et de les manipuler (informatique) ; le *design* et l'ergonomie, pour concevoir des interfaces intuitives et efficaces, aussi bien pour les utilisateurs internes à l'entreprise que pour ses clients ou ses partenaires... Les méthodes de travail évoluent également : l'agilité est privilégiée, grâce à des dispositifs d'innovation permettant de tester rapidement de premières idées ou des prototypes. Le travail s'organise de manière transversale au sein de l'entreprise, et l'ouverture vers des partenaires académiques et industriels, ou vers de jeunes pousses, est un accélérateur d'innovation incontournable.

Le numérique, l'occasion de nouer de nouvelles relations avec l'entreprise

Au-delà des innovations technologiques, la transition numérique se manifeste aussi par de nouvelles attentes des clients en termes de relations avec l'entreprise. Les relations « horizontales », de pair à pair, sont plébiscitées. EDF expérimente ainsi, à Nice, avec CityOpt, un dispositif dans lequel les clients se regroupent en communautés virtuelles (avec un fonctionnement de type « réseau social »), dans lesquelles ils choisissent un projet ou une association locale auxquels ils feront bénéficier de leurs efforts en matière d'efficacité énergétique. La valeur ajoutée d'EDF est dans la mise en relation et dans la proposition d'un cadre dans lequel les consommateurs disposent d'une large autonomie dans le choix de leurs actions et dans l'affectation de leurs gains.

De même, sur le marché des entreprises, EDF a mis en place EDF Connect Entreprises, une plateforme numérique de services basée sur le principe de la coconstruction entre des clients, des *start-ups* et EDF. Le catalogue des services proposés s'enrichit des contributions de la communauté : en fonction des besoins et des attentes exprimés par des clients, des tiers (*start-ups*, PME in-

novantes, développeurs) peuvent proposer des services existants, ou en mettre au point de nouveaux. Les clients bénéficient de services innovants, et les *start-ups* profitent d'un retour rapide et d'une mise en visibilité. Plutôt que de chercher à apporter toutes les réponses, EDF joue un rôle de mise en relation, offrant ainsi à ses clients l'accès à une large gamme de services numériques répondant à leurs besoins.

Grâce aux objets connectés, le numérique contribue à l'évolution des modèles d'activité du fournisseur d'énergie

EDF a lancé fin 2016 une nouvelle filiale, Soweel. Il s'agit d'un fournisseur d'énergie qui propose également à ses clients un objet connecté, un *hub* domotique pour le logement. Cette activité de conception, de vente et d'exploitation d'objets connectés est totalement nouvelle pour EDF, qui n'est pas un fabricant de produits matériels. Elle illustre bien les opportunités qu'apporte le numérique en termes d'évolution des modèles d'activité. Grâce à cette offre, le client dispose du meilleur des deux mondes tant en matière de produits (objets connectés) que de services (fourniture d'énergie). En lui fournissant à la fois l'énergie et le dispositif de pilotage de son chauffage, Soweel permet en effet au client de piloter conjointement son budget et son confort : le client peut ainsi définir le budget maximal qu'il souhaite consacrer à son chauffage, le système s'y adaptera.

Dans un tout autre cadre, EDF va déployer auprès des foyers en situation de précarité énergétique un dispositif d'affichage en temps réel (et en euros) de leur consommation d'électricité. Ce système s'appuiera sur le nouveau compteur communicant Linky. Il permettra aux particuliers de mieux comprendre leur consommation, de la visualiser en temps réel et donc de mieux la maîtriser. Le métier de fournisseur d'énergie va ainsi évoluer jusqu'à intégrer la conception, la diffusion et l'exploitation d'un vaste parc d'objets connectés.

Le numérique (en particulier l'Internet des objets) va enfin constituer un levier déterminant pour la transition énergétique. La montée en puissance des véhicules électriques, le déploiement de panneaux solaires sur les bâtiments, le partage d'énergie entre consommateurs et producteurs locaux : toutes ces évolutions vont être facilitées par l'interconnexion des systèmes électriques avec les objets connectés, et par l'échange de données indispensables au bon fonctionnement de ces écosystèmes. L'articulation entre les « *smart grids* » et les autres acteurs « *smart* » (*smart city, smart home, smart factory, smart building...*) sera de plus en plus étroite : les innovations numériques conduisent ainsi à étendre la mission du fournisseur d'énergie, elles apportent d'innombrables opportunités de nouveaux services pour les clients et vont permettre à la collectivité de toujours mieux maîtriser sa consommation d'énergie et de réduire ses émissions de CO₂ grâce à un nucléaire de plus en plus performant, au développement des énergies renouvelables (ENR) et à un pilotage plus efficace à la fois des réseaux électriques et des installations, chez les clients finaux.



La salle de commande de la centrale de Chooz (Ardennes).

Photo © Alexandre Sargos/EDF Mediathèque

L'énergéticien du XXI^e siècle : le numérique au service du consommateur et de la transition énergétique

Par Fabien CHONÉ

Directeur général délégué de Direct Énergie

Acteur majeur de l'énergie en France et en Belgique, Direct Énergie s'est imposée comme un opérateur équilibré présent à la fois sur la production et la fourniture d'électricité et de gaz naturel. Dans ce cadre, Direct Énergie a fait de l'innovation un des axes majeurs de son développement en s'engageant directement pour mettre le numérique au service de la transition énergétique et des besoins du consommateur. Fournisseur d'énergie « 4.0 », notre société entend ainsi se positionner comme le véritable « chef d'orchestre » de la consommation d'énergie pour ses clients. Toutefois, ce renforcement du positionnement du fournisseur en tant qu'interlocuteur unique du client nécessite d'opérer une redéfinition du cadre réglementaire applicable à la transmission des données afin qu'il soit conforme au dispositif du « contrat unique » (liant le client à un fournisseur assurant à la fois la fourniture et l'acheminement de l'énergie).

Le fournisseur au service du client et de la transition énergétique

Opérateur du XXI^e siècle, Direct Énergie s'est positionnée dès sa création comme un acteur au service du client. Ce positionnement se justifie d'autant plus aujourd'hui qu'il s'inscrit dans un contexte inédit, à la croisée de deux phénomènes : la révolution digitale, par laquelle le consommateur peut bénéficier de dispositifs de suivi et de pilotage de sa consommation, et la transition énergétique, avec le développement des énergies renouvelables et de nouveaux usages (véhicule électrique, autoconsommation...).

Dans ce contexte, Direct Énergie a misé sur le développement du numérique pour renforcer son engagement au service du consommateur au travers d'une stratégie s'articulant autour de deux axes :

- tout d'abord, le développement d'une relation client multicanale s'appuyant sur l'ensemble des supports modernes disponibles (téléphone, messagerie électronique, réseaux sociaux...) pour répondre aux usages des clients. La nouvelle application du groupe, conçue en collaboration avec ses clients, a ainsi été lancée en 2016, permettant notamment un accès simplifié à une série de fonctionnalités clés : suivi des consommations, autorelevé des compteurs... Le groupe a par ail-

leurs mis en place un dispositif de « Bot Messenger », offrant aux nouveaux clients la possibilité d'assurer un suivi de l'ensemble de leurs démarches contractuelles, et ce, jusqu'à la finalisation de la souscription de leur abonnement. Direct Énergie est également attentive à fournir aux consommateurs un cadre pertinent pour l'analyse et le suivi de leur consommation. Ainsi, pour les clients équipés d'un compteur Linky, Direct Énergie établit pour chacun d'eux un bilan mensuel présentant l'évolution de sa consommation sur le mois passé et sa contextualisation : conditions climatiques, conseils pour la réduction de la consommation... L'entreprise met également à la disposition de chacun de ses clients, via son espace personnel, l'ensemble des données détaillées sur sa consommation et propose, dans le cadre de son offre « classique », un rendez-vous annuel, mené par un conseiller expert auprès du client pour faire le point sur son offre et permettre l'optimisation de celle-ci. Plus récemment, Direct Énergie a déployé une opération appelée « Tous Au Courant », lors de la période de grand froid de l'hiver 2016-2017, proposant au consommateur d'être alerté sur l'état d'équilibre du système électrique et d'être informé des éco-gestes à adopter en cas de tension sur le système électrique.

- Deuxième axe de sa stratégie, Direct Énergie a également lancé une politique d'innovation ambitieuse au service

de la transition énergétique et des consommateurs. Pour ses clients multi-sites, notre entreprise a ainsi lancé un dispositif leur permettant de suivre leurs consommations et d'analyser les écarts d'un site par rapport à un autre, il permet également le pilotage de certains usages en vue de renforcer l'efficacité énergétique. Direct Énergie a également annoncé le lancement de plusieurs outils de pilotage et d'optimisation des consommations dont les projets « Maestro » (afficheur dédié permettant la visualisation de la consommation électrique en temps réel, en puissance (KWh) et en euros) et « OnOff », un dispositif de pilotage des usages électriques permettant à la fois le suivi en temps réel des consommations et le pilotage à distance du chauffage et du chauffe-eau, notamment par la réalisation d'opérations d'effacement. Opérateur qualifié pour la réserve primaire par RTE en avril 2017, ce dispositif permet au client de piloter sa consommation en faisant des économies et de contribuer à l'équilibre du réseau en temps réel en participant à l'écrêtement des pointes de consommation en période de tension.

La nécessaire réforme du cadre réglementaire

Attentive à développer une relation client efficace, Direct Énergie s'est donc pleinement engagée dans la mise en œuvre d'une stratégie digitale et numérique au service de la transition énergétique. Pourtant, cette stratégie est aujourd'hui contrainte par un cadre réglementaire rigide, qui entretient une confusion sur l'organisation du marché, sur les rôles confiés aux différents acteurs et les moyens de les exercer, au détriment du consommateur et de la collectivité.

Consacré par une décision du Comité de règlement des différends et des sanctions de l'Union européenne (CoRDIS) de 2008 ⁽¹⁾ comme l'« interlocuteur unique du client », le fournisseur d'énergie est investi à ce titre d'une obligation de conseil et d'assistance. Il est donc essentiel qu'il puisse disposer des informations nécessaires pour assurer pleinement ces rôles. Or, les dispositions réglementaires aujourd'hui en vigueur ⁽²⁾ ne prévoient pas un égal accès aux données entre les gestionnaires de réseaux, en particulier de distribution, et les fournisseurs d'énergie.

Aujourd'hui, il est en effet prévu que les gestionnaires des réseaux de distribution (GRD) soient autorisés à accéder à l'ensemble des données quotidiennes issues des compteurs communicants, par défaut et donc sans consentement préalable du client, alors que les fournisseurs ne pourraient y avoir accès qu'après avoir obtenu le consentement explicite du client. Ce cadre juridique déséquilibré est par ailleurs source de complexité et de confusion pour le consommateur, qui dépend, de ce fait, de deux opérateurs distincts pour le suivi de ses consommations. En effet, si c'est *via* le site du GRD qu'il pourra avoir accès à ses données quotidiennes de consommation, c'est bien son fournisseur qu'il devra solliciter pour l'aider à les comprendre et à les analyser. Dans ce cadre, comment demander à ce dernier d'apporter conseils et assistance, sans lui donner dans le même temps l'accès aux données

nécessaires pour ce faire ? Une mise en cohérence de ces dispositions contradictoires est donc indispensable, et ce afin d'éviter de susciter la confusion chez le consommateur et un surcoût injustifié pour la collectivité.

L'accès du fournisseur aux données doit également être amélioré s'agissant des données relatives à l'état du réseau, où, là encore, il dispose de la responsabilité d'interlocuteur privilégié du client dans le cadre du contrat unique. La relation privilégiée qu'il entretient avec son client apparaît en effet comme un atout essentiel pour pouvoir communiquer rapidement avec celui-ci en cas de situations critiques sur le réseau : délestages, coupures pour travaux, incidents sur le réseau, risque de surtension...

Le renforcement de la place du fournisseur dans la transition énergétique grâce au numérique constitue donc une opportunité qu'il est indispensable de saisir, en tant qu'il doit intervenir au bénéfice tant du consommateur que de la collectivité. À ce titre, c'est vers un meilleur traitement de la donnée qu'il est indispensable d'aller aujourd'hui, en garantissant en particulier au fournisseur l'accès à une information suffisamment fine et pertinente. En ce qui concerne la consommation d'électricité, l'accès du fournisseur à la courbe de charge, *a minima* horaire, apparaît ainsi comme une donnée suffisamment précise, lui permettant à la fois de proposer une adaptation du contrat de fourniture aux besoins spécifiques du client (puissance souscrite, option tarifaire, tarif d'acheminement...) et de développer de nouveaux services et de nouvelles offres liés à la fourniture (pilotage de la consommation, conseils d'efficacité énergétique, rénovation...). Malheureusement, aujourd'hui, le système prévu pour le compteur Linky ne permet toujours pas au fournisseur de conseiller son client de manière fiable sur l'option la plus adaptée à sa consommation en matière de choix entre l'abonnement de base et l'abonnement heures pleines/heures creuses, les données nécessaires n'étant par défaut pas enregistrées dans le compteur des clients. Or, la collecte et l'enregistrement dans les services informatiques (SI) des GRD de la courbe de charge (au pas horaire, *a minima*) sur une durée de 12 mois permettraient ainsi de donner aux fournisseurs la possibilité de s'engager pleinement au service de la transition énergétique, tout en garantissant au consommateur la confidentialité de ses données personnelles.

L'utilisation du numérique au service de la transition énergétique nécessite donc que le cadre législatif et réglementaire de la transmission des données soit optimisé pour permettre aux fournisseurs d'exercer pleinement les compétences qui sont aujourd'hui les leurs. La connaissance de la relation client dont ils disposent est en effet un avantage qu'il est essentiel pour eux d'exploiter, au bénéfice de la collectivité et du consommateur.

(1) CoRDIS, décision du 7 avril 2008.

(2) Décret n°2017-948 du 10 mai 2017 relatif aux modalités de mise à disposition des consommateurs des données de consommation d'électricité et de gaz ; décret n°2017-976 du 10 mai 2017 relatif aux modalités d'accès par les consommateurs aux données de consommation d'électricité ou de gaz naturel et à la mise à disposition de ces données par les fournisseurs.

La révolution numérique, au cœur de la transformation d'ENGIE

Par Gilles BOURGAIN

Directeur adjoint de la Stratégie du groupe ENGIE

Philippe SAINTES

Direction de la Stratégie du groupe ENGIE, en charge des études prospectives dans le domaine de l'électricité

Vincenzo GIORDANO

Observatoire des technologies digitales d'ENGIE

Étienne GÉHAIN

Chargé des programmes de R&D Corporate d'ENGIE sur les technologies digitales et de stockage d'énergie

et Maxime WEISS

Analyste à la direction de la Stratégie du groupe ENGIE

Plus de deux milliards de personnes n'ont pas accès à une électricité fiable dans le monde, alors que les émissions de gaz à effet de serre doivent tendre vers zéro à long terme. Il est urgent d'inventer un nouveau système énergétique en capitalisant sur les évolutions technologiques en cours et sur la mobilisation des acteurs politiques et industriels. La révolution numérique est un des outils pour accélérer cette révolution énergétique. C'est aussi un catalyseur de changement du secteur de l'énergie. ENGIE a engagé en 2016 une transformation profonde pour être le leader mondial de la révolution énergétique. Le numérique est au cœur de cette transformation. C'est un levier transformant puissant pour permettre d'augmenter l'ancrage du groupe avec ses parties prenantes, d'accroître son efficacité opérationnelle, de développer de nouveaux *business* et d'augmenter l'agilité du groupe.

Transition, ou révolution ?

Transition énergétique, ou révolution énergétique ?

À ses débuts, le système électrique européen était décentralisé. L'intégration des systèmes électriques s'est faite progressivement pour bénéficier du foisonnement et des économies d'échelle, au niveau de la production. Ces évolutions se sont faites dans un contexte où la ressource énergétique était disponible en abondance, et où les effets environnementaux étaient encore relativement peu scrutés.

Aujourd'hui, le modèle énergétique mondial se heurte à plusieurs barrières. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), plus de deux milliards d'humains n'ont pas accès à une énergie fiable. Le réchauffement climatique est un enjeu mondial d'une ampleur jamais égalée. L'acceptation locale de différentes sources d'énergie (nucléaire et grand hydraulique, en particulier) constitue

aussi, même si c'est le cas depuis plus longtemps, une donnée clé.

Il devient urgent d'inventer un nouveau modèle durable pour tous

L'idée de « transition » énergétique est celle d'un passage entre un état actuel non durable (le point A) et un état désiré (le point B). **Cette notion se définit donc d'abord par l'objectif visé, et non par les moyens mis en œuvre pour l'atteindre.** Les points A et B diffèrent beaucoup en fonction des territoires :

- le point A sera caractérisé par le niveau d'accès à l'énergie, le type d'énergies utilisées, le niveau de la demande...
- le point B dépendra, quant à lui, du système énergétique reçu en héritage, des ressources énergétiques disponibles, du type de croissance visé, des préoccupations des populations locales...

La transition énergétique est rendue possible par des évolutions récentes (technologiques, sociétales...), qui permettent d'envisager différemment le système énergétique :

- des technologies de plus en plus **efficaces** sont disponibles ;
- les **énergies renouvelables** battent des records de coûts et d'investissements : photovoltaïque à moins de 30 euros du mégawattheure (MWh) au Chili, éolien terrestre à moins de 30 euros/MWh au Maroc, éolien *offshore* à moins de 70 euros/MWh au Danemark... L'économie d'échelle provient davantage du volume de production que de la taille des unités ;
- le coût des batteries a été divisé par 4 en 10 ans et pourrait être encore réduit par deux à l'horizon 2020-2025 ;
- nos **clients** sont de moins en moins intéressés par la détention des biens et de plus en plus concernés par leur origine, leur adéquation à leurs besoins et à leurs usages, la possibilité de les personnaliser...

L'ampleur du défi industriel à relever dans un temps court nous amène, chez ENGIE, à parler plutôt de révolution énergétique que de transition énergétique.

Transition numérique, ou révolution numérique ?

La transition numérique est avant tout une transition tirée par la mise à disposition de nouveaux moyens technologiques. On peut schématiquement résumer en disant que l'évolution vient de notre nouvelle capacité de mesurer et contrôler tout, partout et tout le temps. N'importe quel objet désormais connecté peut devenir un capteur, donc un moyen de contrôle, et détenir une part d'intelligence.

Plusieurs vagues ont structuré le déploiement du numérique :

- le **développement de la portabilité** : le premier iPhone a été commercialisé en 2007. En 2016, le nombre d'utilisateurs de *Smartphones* était estimé à 2,1 milliards ;
- les **données massives et l'Internet des objets** : l'on assiste à une prolifération des objets connectés et à la réduction exponentielle des coûts de capture, de transmission et de stockage des données. En Europe, 200 millions de compteurs intelligents (gaz et électricité) seront installés d'ici à 2020 ;
- l'**intelligence artificielle** s'impose progressivement dans les domaines de la mobilité (voitures autonomes) et de la gestion intelligente de l'énergie (thermostats intelligents dotés d'algorithmes d'apprentissage des habitudes et des préférences des occupants d'un logement en matière de chauffage) ;
- **Blockchain**. La technologie des chaînes de blocs a fait son apparition dans le domaine énergétique permettant d'envisager des transactions de confiance entre individus, sans intermédiaires.

Ces nouvelles technologies révolutionnent tous les domaines (les transports, l'hôtellerie, les télécommunications, la banque, les assurances...) et, en particulier, le domaine énergétique.

Deux destins croisés

La révolution numérique au service de la révolution énergétique

Pour atteindre les scénarios vertueux de réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur énergétique, il convient de jouer sur trois leviers :

- maîtriser les besoins énergétiques (en limitant les déplacements, en dématérialisant la croissance...),
- augmenter l'efficacité énergétique (par les normes des équipements, l'isolation, la mise en place de contrats de performance énergétique...),
- et décarboner le système énergétique en développant les énergies faiblement émettrices de CO₂.

Le numérique peut contribuer à chacun de ces trois axes.

Le numérique peut permettre, notamment, de mieux analyser les besoins détaillés du consommateur en affinant la compréhension de ses différents usages. Hier, on mesurait annuellement la quantité de gaz consommée par un client. Grâce au numérique, nous sommes désormais capables d'identifier le besoin de confort thermique dans chacune des pièces de la maison de chacun des usagers, heure par heure. Le consommateur final peut, grâce au digital, mesurer l'impact de son comportement sur sa consommation d'énergie et agir en conséquence. Ce mouvement sera amplifié par le recours aux énergies décentralisées qui rapprochent la problématique énergétique du consommateur final.

La généralisation de la mesure et des capacités d'optimisation des décisions peuvent par ailleurs permettre d'**augmenter significativement l'efficacité énergétique** aux différents niveaux du système.

Enfin, le numérique peut nous aider à identifier les **ressources d'énergie décentralisées** (production, gestion de la demande, stockage) et à piloter ces différentes sources en les articulant avec les dynamiques du système énergétique, depuis l'évaluation du potentiel de solaire pour chacun des toits jusqu'au pilotage en temps réel du stockage des batteries d'un véhicule intégré à de la production renouvelable locale et au pilotage des différents appareils électroménagers d'une maison.

Le numérique redéfinit en profondeur les frontières du monde de l'énergie

Au-delà de la contribution du numérique nécessaire pour relever les défis énergétiques, il est à noter que celui-ci vient redessiner en profondeur notre secteur industriel :

- Le numérique met le **client au centre des préoccupations**. De plus en plus :
 - l'**expérience utilisateur** (que celui-ci soit simple particulier le matin, professionnel en journée ou citoyen d'une ville le soir) tient une place centrale ;
 - l'utilisateur doit être envisagé **dans ses différentes communautés d'appartenance** (locales, virtuelles...) ;
 - il est nécessaire de **dépasser les approches secto-**

rielles. L'industrie passera successivement de la vente de commodités à la vente de solutions énergétiques, puis à la vente de solutions intégrées permettant d'améliorer l'usage client (celui-ci étant trans-secteur).

- Le numérique fait évoluer les modèles économiques dans le domaine de l'énergie, ceux-ci étant influencés par les modèles économiques du numérique :
 - modèles économiques de type gratuit,
 - modèles économiques valorisant l'implication des consommateurs (effet de réseau de plateformes, sur lesquelles la valeur ajoutée provient de la contribution des clients),
 - généralisation du passage de la commodité au service,
 - développement de plateformes mondiales permettant d'offrir une expérience client similaire, mais personnalisable aux quatre coins du monde,
 - modèles communautaires de type *peer-to-peer*.
- Le numérique peut faire évoluer les organisations en profondeur :
 - en permettant d'envisager des structures plus horizontales et hybrides, qui mobilisent des expertises internes ou externes à l'entreprise,
 - en accélérant le temps de l'innovation : les usagers du numérique sont habitués à des temps d'innovation très courts. Les cycles d'innovation, historiquement plus longs dans le domaine de l'énergie, s'accroissent.

Cette nouvelle donne fait évoluer le paysage concurrentiel dans le domaine de l'énergie :

- des groupes industriels provenant d'autres secteurs (à l'instar des GAFAs) entrent dans le domaine de l'énergie,
- sur certains marchés, de nouveaux entrants bénéficient d'un relatif abaissement des barrières à l'entrée.

Au cœur de la transformation d'ENGIE

ENGIE a engagé une transformation majeure pour devenir le leader mondial de la révolution énergétique

Le groupe a affirmé son ambition d'être le leader mondial de la révolution énergétique en se positionnant comme pionnier. Un important plan de transformation, sur trois ans, a été présenté en 2016. Il prévoit notamment :

- d'ancrer le groupe avec ses parties prenantes au travers d'une organisation en réseau décentralisée (24 *Business Units* et des implantations dans 70 pays),
- d'être une référence mondiale en matière d'efficacité opérationnelle dans ses métiers (avec plus d'1,2 milliard d'euros d'économies récurrentes),
- de recentrer dès aujourd'hui les développements du groupe sur les métiers créateurs de valeur qui permettent d'accélérer la transition énergétique :
 - en se séparant d'activités non stratégiques (plan de cession de 15 milliards d'euros d'actifs sur la production d'électricité, à partir de charbon, notamment),
 - en investissant 22 milliards d'euros dans trois métiers : la fourniture de solutions d'efficacité énergétique, la production d'électricité à faible émission de CO₂ et les réseaux (de gaz, en particulier) ;
- d'accroître l'agilité et l'esprit d'innovation du groupe.

Le groupe a décidé d'accélérer sa transformation en consacrant sur trois ans 1,5 milliard d'euros au digital et à l'innovation, et en mettant en place une gouvernance au plus haut niveau permettant à la fois d'impulser une nouvelle dynamique et d'accueillir les initiatives.

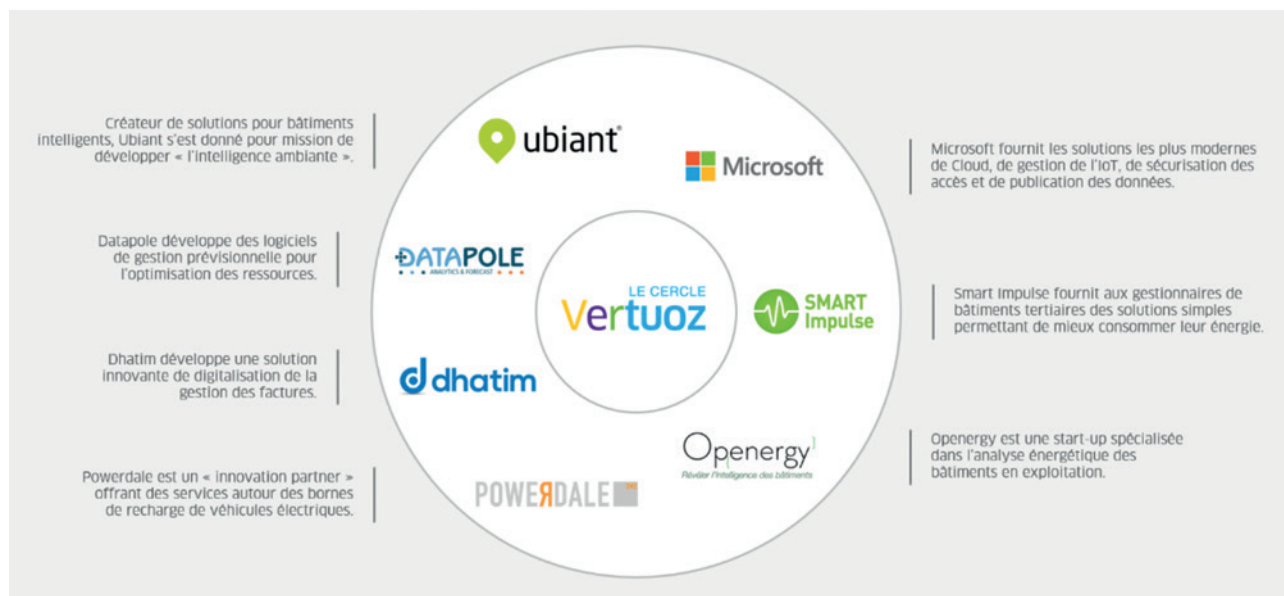


Figure 1 : VERTUOZ, solution digitale pour la gestion intelligente des bâtiments, mobilise un écosystème ouvert de solutions partenaires (le cercle Vertuoz).

Le digital constitue en effet un puissant levier de transformation sur chacun des quatre axes mentionnés ci-dessus. Nous tenterons ici de l'illustrer par quelques exemples.

Le digital contribue à renouveler la relation du groupe avec ses parties prenantes

Avoir un ancrage profond et continu avec ses parties prenantes est un enjeu organisationnel et culturel pour le groupe. Le numérique est un outil puissant pour engager cet ancrage et mettre la connaissance du client au centre du groupe au travers d'une expérience renouvelée.

Le secteur de l'énergie doit répondre aux standards établis par les GAFAs (Google, Apple, Facebook et Amazon) et par les NATUs (Netflix, Airbnb, Tesla et Uber) en termes d'expérience de clients en attente à la fois d'un message clair et simple et d'un retour d'expérience personnalisé.

ENGIE a engagé en 2016 une refonte en profondeur des parcours client digitaux de ses différentes activités, autour de sa nouvelle marque « ENGIE » :

- pour les consommateurs individuels : solution de collecte des données des objets connectés de la maison (par exemple, les thermostats intelligents) détenus en propre ou propriété de tiers, pour proposer des services sur mesure (à l'échelle du monde) ;
- pour les entreprises : solution Vertuoz permettant d'optimiser le pilotage des consommations énergétiques et multi-fluides dans un parc de bâtiments (en France),
- pour les collectivités locales : développement d'outils pour présenter les différents services mis en place par une ville (par exemple, à Nouméa), à destination de ses habitants : acquisition de SIRADEL, leader mondial de la modélisation 3D et d'outils d'aide à la décision des villes (monde).



Figures 2 et 3 : Exemples de simulations 3D de villes réalisées par SIRADEL, leader du domaine.

Le digital contribue à améliorer l'efficacité opérationnelle du groupe

Être la référence industrielle dans ses différents métiers passe par la modernisation des actifs existants et la construction d'actifs de nouvelle génération. Ce chantier comporte évidemment un axe technologique, mais aussi un axe de redéfinition des processus, de conduite du changement et de développement des compétences. On peut citer à cet égard quelques exemples de réalisations :

- production d'électricité : *dispatching* de nouvelle génération de suivi et de pilotage des actifs renouvelables (Monde) ; lunettes 3D permettant de connecter les techniciens opérateurs des centrales à des ressources expertes centralisées (Europe),
- gaz : réalité augmentée permettant de former les techniciens en univers immersif dans les installations gazières (France),
- solutions clients : plateforme « *Big Data* » d'ECOVA qui génère un modèle énergétique unique pour tous types de bâtiment (États-Unis) ; logiciel d'optimisation en temps réel de l'exploitation de réseaux de chaleur et de froid (monde).

La sécurité informatique constitue par ailleurs une préoccupation centrale pour la digitalisation des activités du groupe.

Le numérique permet à ENGIE de proposer de nouveaux *businesses* à plus forte valeur ajoutée (de la commodité à l'usage) à partir d'une connaissance approfondie de ses clients

La transition énergétique nécessite la mise en œuvre d'innovations technologiques, avec des cycles courts, adaptées à chacun des besoins. Le numérique est un levier essentiel :

- pour mettre en place ces solutions technologiques : développement de solutions solaires à partir d'analyse de données satellite permettant de déterminer le potentiel des clients *B2C* (Belgique) ; développement de solutions logicielles de pilotage de batteries par la *start-up* Green Charge, acquise par ENGIE en 2016 (États-Unis),
- faire évoluer les modèles économiques à partir d'une connaissance approfondie des clients :
 - en proposant des services à plus forte valeur ajoutée : fourniture d'usages énergétiques à partir de micro-réseaux et télépaiement avec l'offre PowerCorner (en Afrique) ; développement de services avec engagement de résultat sur l'usage des bâtiments (« *building as a service* ») (en France) ; fourniture de services de mobilité électrique avec l'acquisition récente d'EV-Box (à l'échelle mondiale) ;
 - en ouvrant des secteurs d'activités adjacents à ses métiers historiques à partir des attentes des clients : plateforme d'e-commerce *B2C* pour la commercialisation d'objets connectés en matière d'efficacité énergétique, couplée à une plateforme de services à domicile (en Roumanie et en Belgique) ; développement de services de sécurité informatique pour des sites industriels critiques, faisant ainsi le lien entre l'informatique

de gestion et l'informatique opérationnelle (en France) ; *joint-venture* avec Sigfox pour déployer un réseau bas débit (à l'échelle mondiale) ;

- en proposant des modèles économiques ouverts de plateformes : plateforme Vertuoz de gestion intelligente de l'énergie et des actifs dans les bâtiments, en fédérant un écosystème de solutions innovantes internes ou tierces (à l'échelle mondiale) ; utilisation de la *blockchain* pour sécuriser la « garantie d'origine » de la production d'énergie renouvelable (en France).

Le numérique est un outil puissant pour renouveler les organisations et les méthodes de travail autour d'une raison d'être

Le numérique apporte des bénéfices évidents en termes :

- de mobilisation de l'intelligence collective à travers la création de communautés mondiales au sein d'ENGIE pour pouvoir apporter la meilleure expertise sur tous les territoires grâce à la mise en place d'espaces de travail virtuels,
- d'amélioration de l'expérience des employés en permettant d'avoir des services support internes plus efficaces grâce à une approche individualisée.

Au-delà de ces apports, pouvoir donner accès aux 150 000 collaborateurs du groupe présents dans 70 pays à une culture digitale au moyen de programmes d'échanges (*Digital Academy, reverse mentoring, flying doctors*) est un puissant levier pour développer l'agilité, l'ouverture et l'esprit d'innovation au sein du groupe.

La mise en place de *ENGIE Digital* l'illustre parfaitement. Inaugurée en 2016, cette entité vise à accélérer la transformation digitale en concentrant une expertise de premier rang pour apporter un appui aux entités opérationnelles dans le développement de projets *via* la mise à disposition de plateformes logicielles. Ses principes de fonctionnement sont de plus en plus diffusés en interne :

- **l'ouverture** : ENGIE a structuré des partenariats importants avec des acteurs du monde numérique. Cette ouverture fait écho à *l'open innovation* développée par ENGIE pour enrichir son innovation d'un écosystème ouvert de partenaires externes (*start-ups, centres de recherche...*) : appels à projets ouverts à l'externe, *hackathons, boîtes à idées, capital venture...*

- **l'agilité** : les projets développés chez ENGIE Digital le sont en mobilisant des approches agiles qui sont de plus en plus diffusées au sein de l'organisation.

Conclusion

Les enjeux liés au secteur de l'énergie sont immenses. La transition numérique est un levier indispensable pour réussir la révolution énergétique.

C'est parce qu'ENGIE veut être le pionnier du nouveau monde de l'énergie, que le groupe a mis le numérique au cœur de sa transformation. Le développement de logiciels est un outil puissant de capitalisation de son expertise et de différenciation. Dans une organisation décentralisée pour coller aux besoins des consommateurs, ENGIE développe, avec un écosystème de partenaires, des solutions à l'échelle mondiale, qui lui permettent de conforter localement sa place de leader autour de ses métiers.

Cette transformation est en cours. Les impacts à terme du numérique ne sont pas encore complètement connus. Qui imaginait, il y a quinze ans de cela, la profondeur du bouleversement que le numérique allait impliquer dans notre quotidien ?

De nombreuses questions restent ouvertes :

- Quel sera l'impact réel de la révolution annoncée de la *blockchain* sur les modèles économiques dans le domaine de l'énergie ?
- Quel niveau de décentralisation de l'intelligence aura-t-on à terme, entre une vision systémique et l'intelligence embarquée dans les objets connectés ?
- Quel sera l'impact de la robotisation sur la demande d'énergie ?
- Jusqu'où le numérique fera-t-il évoluer les organisations ?
- Quelles limites le consommateur mettra-t-il à la mise à disposition de ses données personnelles ?

ENGIE explore ces différentes questions en testant des solutions concrètes. La conviction, l'agilité, la culture de ses équipes et son ancrage avec ses parties prenantes constituent les meilleurs garants de la capacité qu'aura ENGIE à générer durablement de la valeur pour accompagner la révolution énergétique.

Réussir la transition énergétique en utilisant les leviers de l'innovation

Par Jérôme SCHMITT

Directeur de l'innovation et de l'efficacité énergétique de la nouvelle branche Gas, Renewable and Power de Total

D'une source majoritaire à l'autre, le monde de l'énergie a toujours été en transition. Cette mutation continue s'opère désormais à un rythme soutenu et nos modèles classiques peinent parfois à l'anticiper. L'impact de la COP21 n'y est pas étranger, tout comme la digitalisation accélérée de la société, la rapide baisse des coûts des énergies renouvelables ou la compétitivité accrue du gaz face au charbon. Du côté des clients, les attentes évoluent aussi. En tant que consommateurs, nous sommes toujours aussi attentifs au coût, mais nous le sommes de plus en plus aussi à l'expérience utilisateur et à l'impact sociétal et environnemental de nos actions. Le digital et l'intelligence artificielle nous permettent de mieux piloter et anticiper. Nous privilégions de plus en plus l'usage à la possession. Grâce au « *leap frogging* », les principales solutions technologiques sont maintenant accessibles (le cas échéant, dans des versions simplifiées) sur tous les continents. Les grands acteurs de l'énergie sauront pour un certain nombre d'entre eux évoluer pour transformer ces contraintes en autant d'opportunités. Au départ souvent développeurs de projets géants et vendeurs de produits, ils devront aussi devenir des concepteurs de solutions intégrées pour le bénéfice de clients, industriels comme particuliers, en recherche d'une consommation et d'un confort toujours mieux optimisés. Les *business models*, plus proches du client, intégreront mieux les notions d'efficacité, d'optimisation des sources et du cycle de vie et, le cas échéant, de compensation. Ils anticiperont de mieux en mieux les baisses de coûts et les évolutions technologiques. Toutes ces transformations sont un terreau fertile pour l'innovation. C'est pour mieux en saisir les opportunités que Total ne cesse d'évoluer.

L'industrie de l'énergie est, par nature, cyclique. La baisse importante des prix du pétrole, entre 2014 et 2016, a pourtant créé la surprise. L'émergence rapide du gaz de schiste aux États-Unis a également pris le marché de court, tout comme cela a été le cas avec la croissance spectaculaire des renouvelables, aussi impressionnante que la baisse des coûts associée, ou l'amorçage vigoureux du marché des véhicules électriques. Malgré la modification des équilibres induite, l'industrie a su globalement rester rentable et en croissance, démontrant ainsi, une nouvelle fois, sa résilience.

Mais ces nouveaux paradigmes nous poussent à nous projeter différemment, d'autant plus que d'autres moteurs de changement émergent :

- les premiers sont activés par l'effet d'accélération suscitée par le déploiement de nouvelles technologies, dès à présent, en Chine, et, bientôt, très probablement, en Inde ou en Afrique. Ces pays-continentaux sont des laboratoires remarquables permettant de vérifier la loi de

Moore : l'adoption d'un nouveau produit y est suivie très vite de changements d'échelle considérables qui modifient leur compétitivité et leur vitesse d'adoption partout ailleurs dans le monde, déifiant souvent les prévisions.

- d'autres sont activés par nos clients. Si le prix reste pour eux un facteur de décision essentiel, l'expérience utilisateur devient elle aussi un élément clé. Les modèles centralisés (dits en *top down*, puisque le client y est essentiellement passif) ne font plus autant recette que par le passé. Le client veut de plus en plus pouvoir comprendre, choisir, agir par lui-même, piloter sa consommation tout en utilisant des outils simples, accessibles, voire produire et commercialiser lui-même, en *peer-to-peer*. Il recherche la sécurité, le confort, mais aussi des solutions responsables. L'énergie devient progressivement une partie d'offres plus larges, intégrées et de plus en plus complexes. La construction de ces offres devient source de différenciation et de création de valeur.

Dans la plupart des chaînes de métiers, la valeur navigue, avec le temps, de l'amont vers l'aval (et vice-versa). Dans

celle de l'énergie, sa création est, en ce moment, importante près du client : il n'est donc pas étonnant de voir à quel point des innovations *business* et technologiques foisonnent, partant de la demande pour remonter vers l'offre.

Pour prendre un exemple connexe à nos métiers – dans le transport et la distribution d'électricité –, il est intéressant de constater qu'avec la croissance rapide des sources de production renouvelables décentralisées, le gestionnaire de réseau « *last mile* » devient, en plus, gestionnaire de capacités de production d'électricité. Et l'émergence du véhicule électrique (avec ses problématiques de charge) va également accroître les enjeux d'optimisation en aval de la chaîne. Ces contraintes nouvelles, dans des métiers historiquement massifiés et centralisés, deviennent autant de gisements de valeur potentiels.

Bâtir de nouvelles offres intégrées et innover au plus près du client, cela implique d'être en mesure d'anticiper et de piloter ses besoins de façon personnalisée. La progression et la baisse rapides des coûts des outils digitaux, et tout particulièrement des capacités de mesure et de pilotage à distance, permettent désormais de créer des *business cases* rentables pour la plupart d'entre eux. Mais elles permettent aussi à de nouveaux acteurs agiles, différents, souvent plus proches du *soft* que de l'énergie, de rompre la chaîne et de capter une partie importante de la valeur à travers le contrôle et l'utilisation des données collectées. Le client contribue à bâtir l'offre par l'information qu'il fournit. La gestion ou le traitement des données de toutes sortes que celle-ci laisse transpirer (souvent au-delà des simples données de consommation) apportent parfois plus de valeur que le service qui lui est vendu.

Parmi les leviers utiles permettant de relever avec succès les défis posés par ces changements, trois, en particulier, se détachent : faire évoluer nos approches historiquement orientées, d'une part, de l'amont vers l'aval de la chaîne et, d'autre part, davantage « produits » que « solutions » ; intégrer positivement les grands défis de demain dans nos métiers et nos offres *business* ; et, enfin, innover résolument au plus près du client.

Total œuvre sur tous ces fronts, et ce depuis plusieurs années : la signature et la ratification de l'Accord de Paris sur le climat nous ont récemment donné l'opportunité de mettre notre travail en exercice.

Même si le scénario des 2 °C de réchauffement maximal de l'AIE laisse une part importante aux énergies fossiles à l'horizon des prochaines décennies, l'intégration des enjeux liés au climat dans la stratégie long terme de Total s'est imposée naturellement. Sortir du charbon, privilégier les projets pétroliers à point mort bas (car ils ne seront pas tous développés), accentuer la part du gaz dans notre portefeuille, accroître notre *leadership* dans les énergies renouvelables, et, plus généralement, dans les *businesses* bas carbone, sont autant de décisions qui ont relevé pour nous de l'évidence. Le Comité exécutif de Total a ainsi posé une ambition claire pour le groupe : devenir la *major* de l'énergie responsable.

En cohérence avec ces défis, il a décidé, en 2016, de créer aux côtés de ses grands métiers historiques (explora-

tion-production, raffinage-chimie, *marketing* & services) la branche *Gas Renewables & Power* (GRP). Cette nouvelle branche comporte, tout d'abord, les *businesses* historiques de valorisation de la chaîne du gaz et de l'électricité, puis ceux, plus récents – quoique déjà clairement ancrés dans le groupe –, du développement des renouvelables – notamment au travers de Total Solar et de Sunpower (dans le solaire) et de Saft (dans le stockage d'énergie).

Notre branche GRP porte également l'ambition de préparer le groupe à de nouveaux métiers bas carbone, au premier rang desquels ceux de l'efficacité énergétique, un des trois enjeux clés de la réussite du scénario 2 °C, qui sont intimement liés aux métiers du digital. S'y ajoutent d'autres métiers plus en devenir, comme ceux du captage, du stockage et de l'utilisation du CO₂ (ou potentiellement de l'hydrogène), et d'autres encore liés à l'énergie distribuée pour lesquels notre capacité d'innovation sera déterminante.

Cinq dispositifs, tous bâtis autour de l'innovation, ont été juxtaposés au service de cette ambition dans les métiers bas carbone. Ils présentent des synergies intéressantes :

- Le premier est lié à la décision prise par notre groupe d'investir le champ des métiers de l'efficacité énergétique : aider nos clients à optimiser leur consommation et leurs émissions et à arbitrer entre les meilleures sources s'est imposé comme un axe de développement clé à l'horizon des vingt ans.

L'opportunité peut être significative. En effet, la croissance du marché des services dans le domaine de l'efficacité énergétique s'établit autour de 8 à 10 % par an. C'est un rythme conséquent pour un marché estimé à plusieurs centaines de milliards de dollars. Certes, à l'heure actuelle, nous ne sommes qu'un acteur du secteur, parmi d'autres. De nombreuses entreprises dans le domaine de l'énergie, de la maintenance, de la distribution, de la construction, des équipements, des *softwares* ou des télécoms y sont déjà actives. Toutefois, « deux poissons-pilotes » éclairent les principaux enjeux pour Total : BHC Energy (en France) et Tenag (en Allemagne).

Dans ce domaine, comme dans d'autres, les clients attendent la fourniture d'un service sur la durée, plutôt que l'achat ponctuel d'un produit. Ils sont de plus en plus en demande de solutions intégrées qui incluent le financement, la sélection des meilleures sources d'énergie, le stockage, l'architecture IT et les installations en dur, le suivi, le pilotage à distance, la gestion de la flexibilité, etc.

Total a décidé d'intégrer ce marché pour apporter à ses clients des solutions leur permettant d'avoir un usage responsable de l'énergie. Cela passe par la promotion de solutions hybrides permettant de réduire l'empreinte environnementale ou encore par l'optimisation énergétique des sites de nos clients grâce à des solutions favorisant la maîtrise des consommations et le rééquilibrage du *mix* en faveur des renouvelables.

Pour nous démarquer, nous pourrions notamment nous appuyer sur notre compréhension profonde des enjeux, notre envergure mondiale, notre accès à tous les marchés

de l'énergie, notre capacité à sélectionner sans parti-pris les meilleures sources et les meilleurs équipements, ainsi qu'à saisir, stimuler ou financer les meilleures innovations.

- Deuxième brique, le développement de nouveaux métiers pour permettre à nos clients, industriels comme individuels, de capter, stocker, utiliser ou compenser leurs émissions de CO₂. Cette brique prend tout son sens après que nous ayons contribué à réduire leur consommation et leurs émissions grâce aux métiers de l'efficacité énergétique, puis que nous les ayons aidés à optimiser leur *mix* énergétique en leur apportant le meilleur cocktail de sources, qu'il s'agisse, par exemple, de gaz, de renouvelables ou de solutions hybrides. Dans ce domaine, nous nous positionnons de manière à participer aux premiers projets commerciaux à grande échelle, tandis que la R&D de notre groupe accroît ses efforts, qui devraient représenter près de 10 % de son budget (hors budget R&D de spécialités) au cours des prochaines années.
- Total Energy Ventures (TEV), l'un des fonds de *corporate venture* les plus actifs de notre secteur, est une troisième brique elle aussi très utile : elle est complémentaire des deux premières. TEV réalise sélectivement des investissements dans les *start-ups* les plus prometteuses pour le groupe. Nous avons déjà investi plus de 160 millions de dollars dans une trentaine de *start-ups* actives dans l'efficacité énergétique, le stockage d'énergie, la valorisation du CO₂, l'accès à l'énergie... Le rôle de TEV est, bien sûr, au premier chef, de faire des investissements rentables, mais aussi, simultanément, d'explorer, de cartographier et de comprendre l'écosystème des *start-ups*, de partager ces connaissances avec l'ensemble des acteurs de l'innovation du groupe et de contribuer à l'émulation interne. Début 2017, TEV a reçu le prix « *Corporate Investor of the Year* » décerné par le Cleantech Group, prix qui souligne la qualité de son portefeuille.

Dans le domaine de l'efficacité énergétique, et du management de l'énergie, en particulier, TEV a investi dans des *start-ups* considérées comme des précurseurs sur les enjeux d'optimisation de la consommation et de gestion de la flexibilité et apporte aux équipes une ouverture et un regard singuliers.

TEV agit également à travers des fonds d'investissements indépendants. L'idée est d'appriivoiser des sujets se situant à la frontière de nos métiers, plus lointains dans le temps ou l'espace, ou trop complexes ou incertains pour être portés seuls. Un exemple s'impose : celui du fonds d'investissement de l'*Oil and Gas Climate Initiative*, une organisation qui regroupe dix des plus grands acteurs gaziers et pétroliers de la planète, qui se sont engagés à apporter, ensemble, des solutions aux enjeux du changement climatique ; Total est l'un des membres fondateurs de cette organisation. L'*OGCI Climate Investment*, qui est doté d'1 milliard de dollars, vise principalement à investir sur 10 ans dans les technologies de captage, de valorisation et de stockage du CO₂, de réduction des émissions de méthane ou d'efficacité énergétique. Ce fonds, lancé fin 2016, est d'ores et déjà actif : il s'apprête à réaliser

ses premiers investissements. Il ne fait aucun doute qu'ils contribueront à éclairer nos choix.

- Quatrième brique, petite et agile, qui exige de nous que nous pensions différemment : l'innovation frugale (et de proximité) *via* les métiers de l'accès à l'énergie. Le choix de la juxtaposer aux côtés des trois précédentes peut paraître surprenant. Il est en fait très cohérent.

Au départ, en 2010, Total a créé une offre qui visait à sélectionner, incuber et commercialiser des solutions solaires individuelles auprès du milliard de personnes n'ayant pas accès à l'électricité dans le monde, principalement en Afrique. À la mi-2017, nous avons déjà vendu dans 35 pays plus de deux millions de produits, permettant aussi bien l'éclairage que la recharge de téléphones portables ou des usages de base améliorant ainsi le quotidien de plus de 10 millions de personnes. L'objectif d'ici à 2020 est de toucher 25 millions de personnes en Afrique en leur apportant des solutions toujours plus puissantes et performantes.

Et autour du cœur de cible historique qu'est pour nous l'apport d'une énergie propre au plus grand nombre, l'on retrouve l'*innovation business*. Pourquoi ?

Parce qu'en matière d'énergie (comme cela a été le cas, avec succès, dans les domaines de la téléphonie et des services bancaires), il est possible que l'Afrique réussisse le tour de force du « *leap frogging* » et qu'elle adopte en masse et de façon rentable (peut-être plus vite parfois que certains pays de l'OCDE) des technologies et des *business models* de demain, en particulier dans les domaines de l'énergie solaire décentralisée et de l'utilisation individuelle à grande échelle du stockage d'énergie.

La conjonction entre, tout d'abord, la forte croissance démographique, l'urbanisation rapide et l'émergence d'une classe moyenne, puis, la difficulté de financer, développer et maintenir des infrastructures de production centralisée et de transport d'énergie à grande échelle sur le continent, et, enfin, l'absence de réglementations solides, devrait paradoxalement aider à aller vite et plus loin en matière d'énergie décentralisée. Cela d'autant plus que l'adoption généralisée du digital et du paiement *via* mobile permettent dès à présent de lever d'importantes barrières en matière de suivi des données de consommation, de performance des outils, de maintenance à distance, de sécurisation des paiements et d'optimisation du parcours client.

In fine, certaines faiblesses de l'Afrique pourraient se transformer en facteurs d'innovation et de progrès accélérés faisant émerger des *business* rentables pouvant être déployés à grande échelle.

Deux conditions sont en effet réunies pour qu'une fois de plus l'Afrique nous étonne : d'une part, l'apparition de solutions frugales, certes simples, mais nécessairement solides et sources d'opportunités *business* pour des entrepreneurs agiles et, d'autre part, un terrain d'incubation, d'observation et de passage à l'échelle passionnant à explorer.

- Cinquième et dernière brique : l'animation et la stimulation de l'innovation en interne. Cette année, un premier

« Innovathon », grand concours interne d'innovation, a permis de faire émerger 50 projets proposés par des collaborateurs de notre groupe pour améliorer l'expérience clients. Cinq de ces projets ont été sélectionnés par un jury et le vote de 1 300 collaborateurs. Ils ont été approfondis durant 48 heures, avec le soutien de *coachs* apportant méthodologie et aide en matière de *business plan* et de prototypage. À la fin des 48 heures, un jury, dont les membres appartenaient ou non à Total, a sélectionné les deux meilleurs projets, qui seront incubés, pour l'un, dans notre incubateur interne et, pour l'autre, chez Techstars, un incubateur dont nous sommes partenaires. Ici, l'idée est de promouvoir l'esprit d'innovation en interne et de favoriser l'émulation pour inventer de nouvelles offres toujours plus proches des attentes des clients, un enjeu critique pour nos activités.

Ces cinq briques convergent étonnamment. Nos métiers de demain pourraient avoir un goût d'économie circulaire prononcé : une relation *business* de plus en plus engagée et interconnectée avec des clients de moins en moins passifs construite autour d'un parcours complet. Nous les accompagnerions de l'anticipation et l'optimisation de leurs besoins jusqu'à la minimisation, l'utilisation, la gestion ou la compensation des déchets produits (CO₂, chaleur, ou autres) en passant par la sélection, le pilotage et le partage de leurs sources d'énergie et des moyens associés.

Le premier pas, essentiel pour réussir, est d'avoir conscience des changements à opérer, de les prendre en

compte, de modifier notre organisation pour pouvoir nous mettre en ordre de marche, de nous convaincre que notre capacité à nous transformer viendra de la clarté et de la force de notre ambition à long terme ainsi que de la cohérence de celle-ci avec ce que la société attend de nous.

Le second pas réside dans l'ouverture d'esprit et la capacité d'innover données aux équipes, dans la confiance accordée à tous pour proposer, essayer et, incuber de nouvelles solutions, de nouveaux *businesses*. Sa fermeté dépend de notre capacité à accepter de ne pas tout maîtriser, à nous remettre en question – et donc de l'humilité et de la bienveillance de chacun.

Le troisième pas se traduit dans une allocation des moyens et une marge de manœuvre adaptées, deux facilités d'autant plus compliquées à accorder que les nouveaux métiers sont souvent culturellement éloignés de ceux portés historiquement. Total a entamé cette marche.

La différence entre les acteurs du marché ne se fera donc pas uniquement sur le financier, l'industriel ou le technologique. Elle reposera très probablement sur l'agilité et sur l'impulsion, l'envie, le sens et le sentiment d'utilité donnés à tous ceux qui mèneront cette transformation. Elle reposera aussi sur l'esprit pionnier, ancré parmi nos valeurs par le Comité exécutif de Total, et donc sur la capacité de l'Entreprise à soutenir l'esprit d'initiative. Enfin, elle reposera sur l'ouverture à la diversité et à la nouveauté.

Digitalisation et gestion ouverte des données : de nouveaux horizons pour les distributeurs d'électricité

Par Michel DERDEVET

Secrétaire général d'Enedis (anciennement ERDF)

Au cœur de la transition énergétique et de la révolution numérique, les réseaux de distribution d'électricité sont désormais entrés de plain-pied dans l'ère du *Big Data*. Le réseau électrique devient de plus en plus « intelligent », équipé qu'il est de multiples capteurs susceptibles de fournir informations et données, au premier rang desquels les 35 millions de compteurs communicants qui équiperont les foyers français d'ici à 2021. Soutenu par les récentes évolutions législatives, le mouvement de fond vers l'*Open Data* devient dès lors pour les distributeurs à la fois une exigence et un levier : exigence économique, sociale et environnementale pour permettre aux territoires d'exercer leurs responsabilités et faciliter le développement de nouveaux services innovants pour les citoyens ; levier pour se transformer et devenir, demain, de véritables opérateurs de données dynamiques et ouverts sur leur écosystème, et favorisant l'émergence de nouveaux modèles économiques de gestion locale de l'énergie.

Les distributeurs d'électricité sont aujourd'hui activement engagés dans un double mouvement, vers le *Big Data* – l'explosion quantitative des données numériques disponibles – et vers l'*Open Data* – la mise à disposition gratuite de ces données, de manière ouverte, ce qui permet leur réutilisation sans restriction technique, juridique ou financière.

Récent, ce tournant est essentiel. L'explosion de l'« Internet des objets » fait qu'il y aura en 2025 dans le monde près de 155 milliards d'objets communicants⁽¹⁾, qui vont accélérer la production massive et le croisement d'informations réutilisables sur l'état des ressources énergétiques (*capacité à répondre à une demande précise...*), sur l'environnement (*météo, niveaux de CO₂ et de monoxyde de carbone dans une habitation...*), la performance des processus (*capteurs dans l'industrie, dans l'agriculture...*) ou les comportements individuels (*comportements au sein de l'habitat, consommation énergétique...*).

La convergence de plusieurs phénomènes technologiques est à l'origine de cette accélération du volume de données générées. Tout d'abord, grâce au *Web 2.0*, Internet est passé d'une phase statique, durant laquelle le contenu *Web* était figé et uniquement produit par des développeurs et autres *webmasters*, à une phase dynamique dans laquelle les utilisateurs ont acquis la capacité de générer eux-mêmes du contenu *via* les *blogs*, les sites de partage et, bien évidemment, les réseaux sociaux.

Le succès, fulgurant, des mastodontes Facebook (1,7 milliard d'utilisateurs actifs) et Twitter (310 millions d'utilisateurs) est un autre facteur qui a amplifié le phénomène de la génération de données par les utilisateurs. Par exemple, en 2012, c'étaient 500 téra-octets de données qui transitaient chaque jour *via* les serveurs de Facebook (soit l'équivalent de 10 000 disques *Blu-ray*).

Ajoutons à cela l'augmentation du nombre d'appareils connectés par individu. On parle d'une moyenne de 2,5 appareils par personne sur Terre, en 2017.

Les logements sont de plus en plus « *smart* », connectés par le biais de leur téléviseur, de leur réfrigérateur ou de leur machine à laver, mais aussi par leurs thermostats et leur compteur électrique...

Mais l'Internet des objets va bien au-delà des foyers. Par exemple, la quasi-totalité des équipements des avions (tels que les moteurs, les volets ou bien les trains d'atterrissage) possède déjà une connexion à Internet et génère des données. Selon Virgin Atlantic, un Boeing 787 fournit ainsi près d'un demi-téra-octet de données... par vol.

Dans l'industrie, les capteurs ont envahi les chaînes de production, tandis que les villes deviennent elles aussi de plus en plus « *smart* » et connectées.

(1) Donnée *Idate*.

Autre exemple, toujours aux États-Unis, UPS a mis au point un nouveau système de guidage pour ses véhicules grâce à l'analyse en temps réel des données générées par les conducteurs et les véhicules eux-mêmes. Ce système permet à UPS de réaliser des économies de temps, d'argent et de consommation de carburant, ce qui lui donne un réel avantage compétitif.

Cette prise de conscience générale de l'importance de la *data* annonce un chamboulement des règles en termes de compétitivité. La *data* a franchi un cap, passant d'une fonction de support à celle de ressource stratégique, ce qui au passage transforme en profondeur les organisations. Les stratégies d'entreprise seront de plus en plus « *data-driven* », car le *Big Data* est un moteur d'innovation et un générateur de nouveaux modèles économiques. L'entreprise de demain sera une entreprise « quantitative », en prise directe avec son environnement, une entité en constante évolution, dont la ressource la plus précieuse seront ses *data*.

L'énergie et les grandes infrastructures liées ne sont pas à l'abri de ces bouleversements majeurs. Demain, plus encore qu'aujourd'hui, le réseau électrique sera lui aussi « intelligent » : il sera équipé de multiples capteurs susceptibles de fournir des informations et des données à toutes sortes d'utilisateurs.

En ce sens, l'existence, à l'horizon 2021, de 35 millions de compteurs intelligents connectés sera bien sûr LA « brique » décisive qui permettra de multiplier par un facteur allant de 2 000 à 4 000 les informations relatives à la consommation d'électricité, lesquelles seront mises à la disposition des consommateurs et des collectivités.

La pertinence du compteur Linky repose, d'une part, sur les optimisations d'exploitation rendues possibles par ce type de compteur communicant et, d'autre part, sur le développement par des tiers de services à potentiel de valeur, qui permettront notamment de piloter efficacement les démarches de maîtrise de l'énergie. Sur ce dernier volet, externe aux distributeurs, l'enjeu de l'exploitation des données de consommation et des fonctionnalités en aval du compteur reste clé : il s'agit de faciliter l'accès à la donnée, d'en stimuler les usages et d'en multiplier les applications, ainsi que de créer les conditions de la démultiplication des services autour de Linky, tout en assumant pleinement le rôle de « tiers de confiance » garant de la protection des données des consommateurs. Le développement de l'utilisation des fonctions aval de ce compteur⁽²⁾ fait également partie des enjeux, car il confirmera, par la démonstration de son interopérabilité, la pertinence du choix technologique et industriel de Linky.

Mais l'*open innovation* permet de voir émerger bien d'autres applications utiles pour la gestion optimale du réseau : ainsi, à Toulouse, Enedis s'est investi dans le projet Sogrid, qui, grâce à des puces électroniques⁽³⁾ intégrées à différents endroits de la ligne, doit permettre de connaître en temps réel l'état de l'ensemble du réseau ; via un partenariat avec la *start-up* GeoKaps, il lui est aussi désormais possible de « cibler » de manière spécifique sur Twitter les clients victimes d'un incident d'alimenta-

tion électrique et de leur envoyer en temps réel des messages personnalisés.

Un point important est à rappeler à cette occasion : toutes les données générées et gérées par les distributeurs d'électricité ont vocation à être restituées à trois catégories précises d'utilisateurs : le réseau lui-même, pour affiner sa gestion, améliorer ses performances et garantir la sécurité d'alimentation en électricité des territoires qu'il dessert ; les clients, qui reçoivent déjà, de manière individuelle, de la part d'Enedis, des données liées à leur consommation et des données relatives à l'état du réseau ; et, enfin, les collectivités qui, sur la base de données agrégées (et donc anonymisées), peuvent utiliser celles-ci pour mettre en œuvre leurs politiques d'efficacité énergétique locales.

L'intérêt d'un engagement industriel des entreprises de distribution d'électricité dans cette « révolution » réside à l'évidence dans leur expertise en matière de systèmes d'information et dans leur capacité à traiter, à stocker et à certifier, en continu, de manière neutre et sous le contrôle des pouvoirs publics, ces importants flux de données.

Cela doit nous amener à distinguer, au sein de la chaîne d'activités de la « donnée électrique », six activités distinctes : sa production et sa collecte, son extraction et son « nettoyage », son transport/stockage, son intégration, son analyse/interprétation et, enfin, l'interface client.

Les trois premières « briques » d'activité constituent à l'évidence le « Core-IT » du distributeur – un actif stratégique s'il en est –, car elles garantissent un fonds de données brutes qualifiées et stockées de manière sécurisée. À l'heure où l'influence des GAFA⁽⁴⁾ est présente dans tous les esprits, ce détail n'a rien de mineur...

Au-delà, l'implication des gestionnaires de réseaux de distribution d'électricité peut se matérialiser via différents types de plateformes (technologiques, servicielles, organisationnelles) construites avec différents types d'acteurs, mais qui ont pour caractéristiques communes de constituer des places d'échanges (virtuelles ou physiques) plurielles (avec un minimum d'intermédiaires), de reposer sur des outils technologiques facilitant la rapidité et la sécurisation des échanges et de rassembler des informations multi-métiers et/ou multi-secteurs.

En général, la constitution d'une plateforme de données nécessite des compétences en matière d'intégration de données multi-sources (uniquement internes, ou croisées avec des données externes). Des coopérations peuvent être envisagées pour accéder à des données tierces et enrichir la proposition de valeur pour les utilisateurs de la plateforme. Mais une chose est sûre : Enedis a pleinement l'expertise et le positionnement lui permettant d'ambitionner, dans cet esprit, d'être un véritable opérateur de données.

(2) Accès aux données en temps réel via les technologies de l'information et de la communication, et pilotage des équipements via les huit relais secs qui permettent de « plugger » sur le compteur toute une série de fonctionnalités communicantes supplémentaires.

(3) Capteurs bas débit de Sigfox.

(4) Acronyme désignant les « géants du Web » (Google, Apple, Facebook, Amazon).

Ainsi, Enedis travaille déjà à l'élaboration de nombreuses plateformes territoriales innovantes, en lien avec les collectivités. Parmi celles-ci, le prototype Synchronise vise à fournir les volumes consommés et injectés dans le réseau du territoire du Mené (en Bretagne), une des premières Communauté de communes innovante sur le plan énergétique et pionnière du label Tepos⁽⁵⁾ ; le projet Dethermalisation vise à analyser sur l'île d'Yeu, sur une durée de quatre ans, les corrélations entre la puissance électrique appelée sur le réseau et la température extérieure ; avec le prototype Pointe Maille Iris, l'ambition est de fournir aux communautés urbaines de Lyon et de Grenoble les données relatives à la puissance maximale atteinte sur le réseau, celle-ci étant recalculée à la maille Iris⁽⁶⁾.

Des algorithmes de calcul et l'expertise métier vont permettre d'analyser et d'interpréter les données mises à disposition sur la plateforme pour proposer ensuite des services aux utilisateurs de celle-ci (en général sous la forme d'applications). Cela offrira à l'évidence une infinité de possibilités nouvelles permettant non seulement d'accompagner les prises de décision, d'acquérir des connaissances et d'optimiser les activités, mais aussi d'innover.

Grâce à leur gestion dynamique des données, les distributeurs d'électricité deviendront demain de véritables services publics modernes du XXI^e siècle adaptés à leur époque et capables de soutenir les modèles émergents de gestion locale de l'énergie (autoconsommation, production décentralisée...). Leur devoir sera de mettre les données à la disposition des parties prenantes, en *time-to-market* et aux standards de la technologie.

Les informations générées seront déterminantes pour améliorer et construire, dans un processus d'innovation continue, de nouveaux services à destination des consommateurs et, plus largement, des citoyens. Grâce aux nouvelles technologies de l'information et de la communication et à l'usage de l'Internet, va ainsi voir le jour une nouvelle économie de l'énergie fondée sur une connaissance toujours plus fine des usages du client. Et tout cela va bouleverser, en profondeur, les intermédiations traditionnelles de la chaîne de valeur de l'électricité.

Dans ce nouveau contexte, les gestionnaires de réseaux de distribution doivent faire évoluer à la fois leur positionnement, leurs missions et leurs méthodes : de gestionnaires de réseaux, ils deviennent *mutatis mutandis* des gestionnaires locaux de systèmes, ces acteurs de premier plan de l'intégration des ressources décentralisées et des nouveaux usages qui leur sont associés (recharge de véhicules électriques...).

Cette mutation est appelée de leurs vœux par les consommateurs : selon une étude menée par Harris International⁽⁷⁾, 9 Français sur 10 s'estiment aujourd'hui mal informés sur l'utilisation de leurs données par les entreprises, et seuls 37 % estiment que les entreprises et les organismes publics font un usage « responsable » et « raisonnable » des données en leur possession.

La publication transparente des données, au bénéfice de tous, devient dès lors pour les distributeurs à la fois une exigence et un levier : une exigence économique, sociale

et environnementale pour permettre aux acteurs publics des territoires d'exercer leurs responsabilités et faciliter le développement de nouveaux services innovants pour les citoyens ; un levier pour les distributeurs pour se transformer, s'adapter à la demande nouvelle de leur écosystème et gagner en agilité. Une chose est sûre : leur engagement est essentiel pour faire émerger de nouvelles plateformes locales de flexibilité⁽⁸⁾, associées aux multiples initiatives engagées en matière de réseaux électriques intelligents (*smart grids*).

Mais, au-delà des opportunités qu'offrent les données, leur développement exponentiel génère aussi des risques, qui nécessitent un encadrement réglementaire et juridique, notamment au niveau de la protection des données personnelles et des savoir-faire des entreprises.

Jusqu'ici, le statut juridique de la donnée était très peu étoffé, notamment en ce qui concerne son utilisation et sa mise en œuvre dans des algorithmes d'intelligence artificielle. Or, les questions soulevées sont nombreuses : qui « possède » quelle donnée ? Quel droit en découle quant à l'utilisation exclusive ou au partage de celle-ci ? Qu'en est-il du partage de la valeur supposée (actuelle et future) de la donnée ?

Plusieurs textes récemment adoptés ou encore en préparation précisent le cadre juridique afférent.

Au niveau communautaire, la Commission européenne prépare actuellement un certain nombre de textes (4^e Paquet Énergie, nouveau *Market Design*...), dans lesquels elle confirme et reconnaît, aux côtés des TSO (*Transmission System Operators*), le rôle incontournable des DSO (*Distribution System Operators*) en tant que « *neutral market facilitators* ».

Au niveau national, les distributeurs sont juridiquement garants d'un « service public de la donnée », opérant sur l'ensemble d'une chaîne allant de la collecte de la donnée jusqu'à sa mise à la disposition des parties prenantes. En ce qui concerne la collecte des données, les gestionnaires de réseaux de distribution (GRD) ont en charge (au titre des articles L. 322-8 et L. 322-9 du Code de l'énergie) la mission de comptage, en particulier la collecte et la gestion des données, ainsi que les missions de construire et d'exploiter le réseau, de veiller à l'équilibre des flux électriques, ainsi qu'à l'efficacité, à la sécurité et à la sûreté du réseau. L'exercice de ces missions implique la collecte d'un nombre considérable de données des plus variées : données de comptage, données techniques relatives au réseau, mais également données clients et données relatives au fonctionnement des marchés de l'électricité.

(5) Voir « L'Avenir énergétique, cartes sur table », Jean-Marie CHEVALIER, Michel DERDEVET et Patrice GEOFFRON (2012), Gallimard.

(6) Découpage du territoire défini par l'INSEE par quartiers comptant environ 2 000 habitants.

(7) Enquête réalisée en ligne du 29 février au 2 mars 2016 pour le cabinet de conseil Quantmetry.

(8) Selon la définition du Conseil national du Numérique (voir la note « Plateformes et dynamiques concurrentielles », 2015), une plateforme est un service occupant une fonction d'intermédiaire dans l'accès aux informations, contenus, services ou biens édités ou fournis par des tiers.

Photo © Jean-Claude Moschetti/REA



Un espace autonome en énergie (une « blue zone ») dans le quartier populaire de Zongo à Cotonou (Bénin).

« L'autonomie en énergie peut être permise par des systèmes couplés de production intermittente et de stockage. »

Pour ce qui est de la protection des données, les GRD sont chargés de protéger les données sensibles qu'ils gèrent, dans un cadre juridique précis. D'une part, la confidentialité des informations désignées comme commercialement sensibles par le décret n°2001-630 du 16 juillet 2001 doit être assurée afin de ne pas porter atteinte aux règles de concurrence libre et loyale. D'autre part, certaines données qu'ils traitent ont un caractère personnel au sens des lois Informatique et Libertés de 1978, elles doivent donc être traitées dans le respect de règles strictes, sous la vigilance de la CNIL. Enfin, le distributeur doit également garantir la protection des données relevant de la sécurité nationale, du secret industriel ou du secret des affaires.

Ce cadre législatif et réglementaire a été notablement enrichi ces derniers mois, avec toujours un objectif commun : encourager une communication toujours plus large des données disponibles.

La loi relative à la gratuité et aux modalités de la réutilisation des informations du secteur public du 28 décembre 2015 (dite loi Valter) pose le principe de la gratuité de la réutilisation des informations publiques, la redevance étant l'exception.

La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)⁽⁹⁾ prévoit, en son article 28, qu'Enedis fournisse

aux propriétaires et gestionnaires d'immeubles justifiant de la mise en œuvre d'actions de maîtrise de la consommation en énergie pour le compte des occupants les données de consommation annuelles agrégées de l'immeuble. Elle consacre surtout un article essentiel, l'article 179, qui se rapporte à la transmission de données de consommation et de production annuelle aux personnes publiques en ayant besoin pour exercer leurs compétences, et au grand public (des données agrégées à différents niveaux géographiques). Enedis publie ainsi en *open data* des données de consommation annuelle par secteur d'activité et des données de production annuelle par filière à la maille Iris. En 2018, est programmée la publication d'une estimation de la part thermosensible des consommations, toujours à la maille Iris ; et, en 2019, les données de consommation annuelle à l'échelle d'un bâtiment seront systématiquement mises à disposition en *open data*.

La loi pour une République numérique (dite loi Lemaire), adoptée le 7 octobre 2016, prévoit, quant à elle, en son article 1, la transmission aux personnes publiques des documents produits ou reçus par Enedis qui leur sont nécessaires à l'accomplissement de leurs missions de ser-

(9) Publiée au Journal Officiel du 17 août 2015.

vice. Cette loi organise aussi un *open data* des données d'intérêt général, et un *open data* des données « détaillées » de consommation et de production afin de favoriser le développement d'offres d'énergie et d'usages et de services énergétiques, dans le respect de la vie privée des personnes concernées grâce à des méthodes d'anonymisation qui seront définies ultérieurement par décret.

Quels que soient les impacts de ces différents textes, une chose est sûre : les gestionnaires de réseaux de distribution d'électricité sont en train de se transformer à grands pas en « gestionnaires de systèmes électriques », avec pour eux des mutations importantes qui sont déjà tangibles dans les différents pays de l'Union européenne.

Pour assumer ces mutations, les distributeurs doivent bien sûr se fonder sur leurs activités historiques de comptage, mais ils doivent aussi, impérativement, aller au-delà de celles-ci et devenir de véritables gestionnaires de données à la fois dynamiques et ouverts sur leur écosystème.

Sous peine de disparaître, et d'être « ubérisés » par d'autres acteurs plus agiles, ils doivent se « numériser » à grands pas et, se projetant dans l'avenir, se préparer à la complexité de la cocréation avec des écosystèmes entièrement nouveaux, tant territoriaux que technologiques. Les GRD doivent s'adapter aux évolutions et aux ruptures perceptibles du système électrique, que celles-ci se manifestent par le développement de marchés locaux de flexibilité, l'autoconsommation et les transactions « *peer to peer* », le *roaming* concernant les bornes de recharge des véhicules électriques, les architectures « *Vehicule to Grid* », ou encore par le déploiement de systèmes couplant production intermittente et stockage d'électricité...

Les « missions systèmes » traditionnelles des opérateurs de distribution (mais aussi des opérateurs de transport)

sont appelées à évoluer dans de nouveaux cadres de cohérence régionaux et nationaux pour assurer une transition énergétique des territoires, qui s'appuie sur une approche pragmatique par grandes zones géographiques économiquement et techniquement cohérentes.

En plaçant à un niveau élevé d'exigence, de performance et d'excellence leur activité d'opérateurs de données, les distributeurs doivent rendre possible le développement de plateformes de marchés adaptées au pilotage de flexibilités locales et favoriser l'émergence de nouveaux modèles économiques résilients intégrant les ruptures attendues (*blockchain*, certification de flux « *peer to peer* », garant neutre facilitateur de l'« *Electric Vehicle to Grid* » (*EV to grid*), etc.).

Les initiatives sont déjà nombreuses en la matière, qu'il s'agisse des démonstrateurs développés par Enedis dans toute la France ou des initiatives d'acteurs de la filière ou de collectivités territoriales. Cependant, cette dynamique ne pourra produire réellement tous ses effets qu'avec une action proactive des régulateurs. Par exemple, malgré l'engagement de l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR) en faveur de la *blockchain* au travers du Forum FinTech et du pôle FinTech Innovation, la régulation française apparaît aujourd'hui en retard par rapport à la régulation britannique, qui délivre d'ores et déjà des agréments aux entreprises utilisant la *blockchain*.

Une chose est sûre : la distribution jouera un rôle clef dans la digitalisation du système électrique, qu'il s'agisse de la révolution de la *Data* ou de l'essor de nouvelles technologies telles que les *smart grids*. Et cela impliquera une mutation fondamentale, celle du distributeur en gestionnaire de systèmes locaux. Mais cela ne sera possible qu'au sein d'une dynamique d'ensemble de l'écosystème électrique français, en particulier dans sa dimension régulatoire.

Premier *microgrid* de quartier à énergie partagée, RennesGrid® est le préfigurateur de la transition énergétique à l'échelle territoriale

Par Thierry DJAHEL

Directeur développement et prospective, Schneider Electric

Soucieux de s'engager plus concrètement dans une politique d'économie d'énergie et de transition énergétique, Rennes Métropole et Schneider Electric ont initié le projet RennesGrid® qui vise à expérimenter au cours des vingt prochaines années le pilotage énergétique de la ZAC de Ker Lann. Située sur la commune de Bruz, à 12 kilomètres au sud-ouest de Rennes, cette zone de plus de 160 hectares présente la particularité d'être un campus regroupant une soixantaine d'entreprises spécialisées dans la haute technologie, 17 écoles de l'enseignement supérieur et de la recherche et centres de formation, ainsi qu'un ensemble immobilier résidentiel et d'hébergement pour des étudiants.

RennesGrid® permettra au campus de Ker Lann de devenir plus indépendant vis-à-vis des énergies carbonées grâce à la production d'une énergie renouvelable locale à partir d'installations photovoltaïques. L'enjeu pour les consommateurs du site est double : réduire leurs besoins énergétiques et autoconsommer une énergie renouvelable produite localement.

Prévue pour être opérationnelle fin 2017 et disposant d'un budget global d'investissement de 5,8 millions d'euros, cette expérimentation conduite par Schneider Electric, en partenariat avec Rennes Métropole et la commune de Bruz, repose sur un mode d'exploitation privée (une société d'actions simplifiée) d'une emprise foncière d'une superficie de trois hectares sur la base d'une concession d'une vingtaine d'année. Mais le modèle économique de ce projet est avant tout construit autour d'une démarche collaborative (notamment avec les résidents de la ZAC) s'accompagnant d'un dispositif de financement participatif innovant.

La diminution des ressources énergétiques fossiles et la hausse durable de leur prix, l'augmentation considérable des besoins en énergie, les difficultés d'approvisionnement, le poids du secteur énergétique dans les émissions de CO₂ et la lutte contre le changement climatique imposent d'adapter les modes de production et de consommation d'énergie.

Ainsi, des actions sont menées pour répondre à ces problématiques. En France, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte fixe un objectif ambitieux, celui de porter la part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation totale d'énergie en 2030. Cependant, la multiplication des installations *ad hoc* a des impacts notables sur les systèmes et les réseaux électriques. En effet, une partie de la production d'origine renouvelable est

intermittente et est peu (voire pas du tout) pilotable, alors que les réseaux électriques ont été conçus à l'origine pour acheminer de l'électricité produite de façon centralisée et dans un seul sens, de la production vers la consommation.

Pour s'adapter à cette massification d'énergie renouvelable intermittente, les réseaux électriques doivent innover et devenir plus « intelligents », en intégrant les nouvelles technologies de l'information et de la communication pour favoriser la circulation bidirectionnelle d'informations en temps réel et pour permettre une gestion plus efficace des réseaux. Dans ce cadre, les *microgrids* apparaissent comme l'une des solutions possibles pour intégrer les énergies renouvelables, tout en répondant aux objectifs fondamentaux assignés aux réseaux : leur fiabilité, leur sécurité et leur qualité.

Un *microgrid* est un système énergétique qui permet à un bâtiment ou à un quartier de s'approvisionner en électricité, voire en d'autres énergies, de façon autonome, tout en demeurant connecté au réseau national. En favorisant l'intégration de technologies numériques aux réseaux, il devient possible de les piloter plus facilement, et ce, en répondant à plusieurs objectifs, notamment :

- pour intégrer et stocker plus d'énergie renouvelable produite localement ;
- pour sécuriser le réseau à tout moment ;
- pour comprendre et agir au quotidien sur les consommations d'énergie ;
- pour développer la mobilité électrique...

Mais avant d'envisager leur diffusion à une plus grande échelle, les *microgrids* doivent faire sauter de nombreux verrous, tels que l'anticipation de l'évolution de leur environnement de production (prédiction des apports des énergies renouvelables intermittentes), l'intégration de la technologie numérique et sa compatibilité avec le matériel électrique existant sur le réseau et l'articulation entre la conduite du réseau électrique et l'optimisation des flux énergétiques.

Face à ces enjeux de sécurisation énergétique, un groupement de territoires de l'Ouest de la France a décidé de s'impliquer fortement dans une transition énergétique efficace, il a été récemment retenu pour constituer la création d'une « vitrine » de l'excellence industrielle française au service de la transition énergétique et de la croissance verte, au travers du projet SMILE (*Smart Ideas to Link Energies*). Ce regroupement de collectivités s'est ainsi engagé à accompagner dix-sept chantiers et divers projets in-

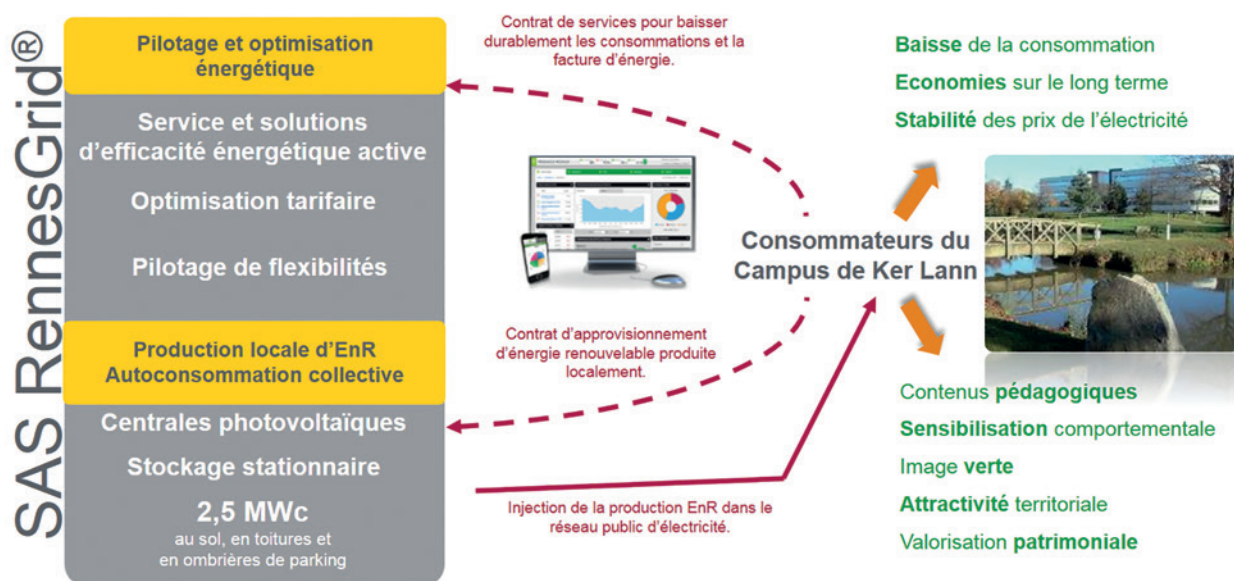
dustriels associés interagissant au cœur des deux régions concernées, les Pays de la Loire et la Bretagne.

En particulier, le chantier Zones d'activité intelligentes du projet SMILE consiste à cibler des sites de type ZAC, éco-quartiers ou ports afin d'y déployer une dizaine de projets de *microgrids*.

Pionnière en matière de bien-vivre, Rennes Métropole est un territoire dynamique qui se développe, se renouvelle. La gestion de l'énergie est au cœur de ses préoccupations. Les *microgrids* s'inscrivent tout naturellement dans cette vision et viennent consolider cette nouvelle étape de l'histoire du territoire. C'est ainsi qu'est né le projet RennesGrid®, qui est au cœur de trois enjeux majeurs liés au développement de la métropole rennaise : le renouvellement urbain, la gestion de l'énergie et l'excellence numérique. Ce projet est mis en œuvre à l'échelle du quartier du campus de Ker Lann, lequel s'étend sur 165 hectares au nord de la ville de Bruz, à 12 kilomètres au sud-ouest de Rennes, qui représente un potentiel intéressant en matière de déploiement de technologies *microgrid* et de solutions à la fois intégrées et exportables. Ce site regroupe en effet une vingtaine d'établissements de formation publics et privés, une soixantaine d'entreprises spécialisées dans la haute technologie, ainsi qu'un ensemble immobilier résidentiel (de plus de 1 000 chambres), et de restauration et d'hébergement pour des étudiants. On y observe une utilisation dominante de l'énergie électrique pour de nombreux usages, notamment le chauffage domestique.

Le projet RennesGrid®, qui a été initié par Schneider Electric, a pour objectif de concevoir et de mettre en œuvre sur le territoire de Rennes Métropole un démonstrateur

Microgrid d'autoconsommation collective à l'échelle d'un quartier



Source : Schneider Electric.

Les applications de SmartGrid

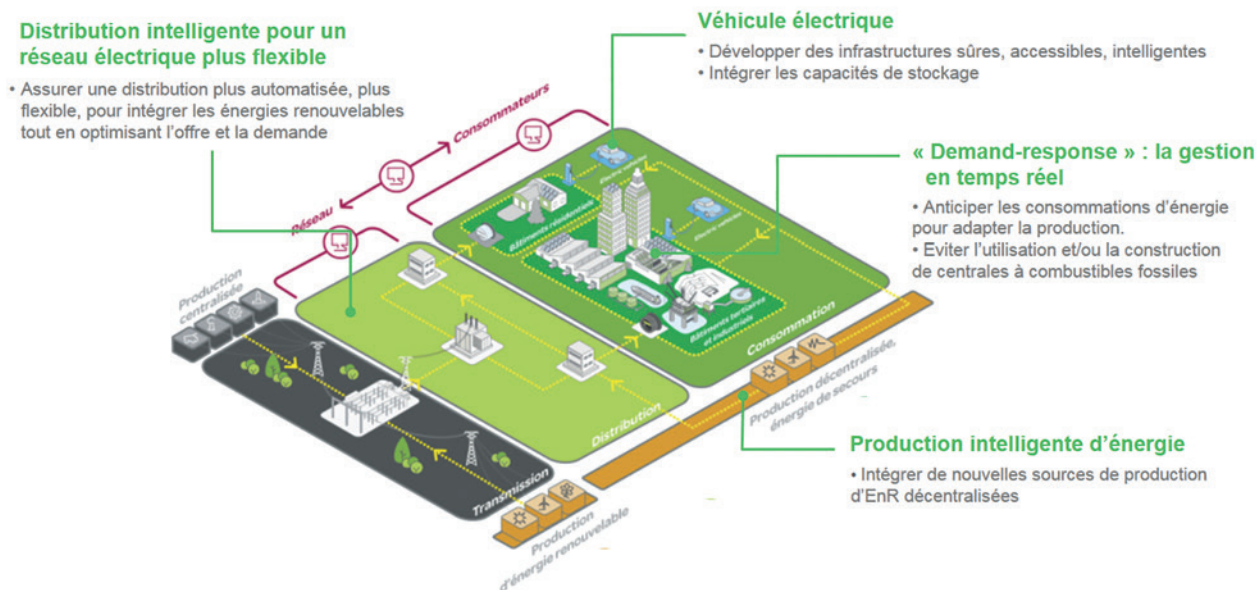


Figure 2 : Représentation des applications et flux d'énergie.
Source : Schneider Electric.

de *microgrid* préindustriel de taille significative permettant d'organiser l'autoconsommation partagée d'un ensemble de centrales de production d'électricité renouvelable (photovoltaïque) couplées à des dispositifs de stockage stationnaires.

RennesGrid® consiste notamment à développer et à exploiter de nouveaux modèles d'affaires basés sur des services innovants autour de la gestion active de l'énergie et des applications numériques. Il s'intègre ainsi pleinement dans le processus de développement des flexibilités au regard de l'essor des énergies renouvelables (EnR) prévu par la loi de transition énergétique pour la croissance verte (TECV), et ce en cherchant à rendre plus flexible le système électrique et en proposant d'étendre les solutions développées en la matière aux territoires, qui sont le lieu par excellence de la construction de ces démarches TECV.

Pour mener à bien ces objectifs, le projet vise à valoriser une solution globale de transition énergétique consistant, tout d'abord, à développer de façon expérimentale, puis à rentabiliser de nouvelles technologies de l'énergie basées notamment sur :

- la production d'EnR issue majoritairement d'une centrale photovoltaïque (PV) au sol complétée de centrales installées en toiture (de bâtiments) et en ombrières (au-dessus de parkings) ;
- la gestion active de la demande d'énergie et l'autoconsommation de la production locale d'énergie renouvelable ;
- des dispositifs de stockage pour permettre l'utilisation

différée des énergies renouvelables aux heures de pointe de consommation.

Les principaux acteurs industriels du projet (à savoir Schneider Electric, Langa, Enercoop et Enedis) sont accompagnés dans la réalisation de celui-ci par différents acteurs territoriaux : la Caisse des Dépôts et Consignations, Rennes Métropole et Éco-origins. Ils ont décidé de créer une société par actions simplifiée, RennesGrid®, qui devrait voir le jour au cours du second semestre 2017. RennesGrid® vise également à faire collaborer, autour de cette expérimentation, d'autres investisseurs, notamment, en mode participatif, des usagers et des acteurs institutionnels, économiques et académiques du territoire : à ce titre, le site de Ker Lann est jugé particulièrement intéressant. Ainsi, il est question de piloter le site de Ker Lann dans sa dimension énergétique pour qu'il devienne plus autonome sur le plan énergétique et plus indépendant vis-à-vis des énergies carbonées et des fluctuations du marché en favorisant l'autoconsommation et la mutualisation des productions d'énergie renouvelable. Le projet a en outre vocation à être exemplaire pour les utilisateurs de Ker Lann en matière de promotion des nouveaux usages électriques.

Avec un budget global d'environ 5,8 millions d'euros, le projet RennesGrid® devrait progressivement connaître le succès économique en termes de reproductibilité grâce à son principe fondateur qui est basé sur un modèle d'affaires innovant et inédit. Il repose sur une combinaison astucieuse de services maîtrise de la demande d'énergie (MDE) et d'EnR produites localement grâce à des ins-

tallations photovoltaïques couplées à des dispositifs de stockage stationnaires. L'accent est donc mis sur une optimisation entre la production photovoltaïque locale et sa consommation par les habitants de la ZAC et sur la possibilité, pour le projet, d'être acteur des marchés de l'effacement, et ce, afin d'accroître la flexibilité au service du système électrique et des besoins locaux (maximiser l'autoconsommation ou, éventuellement, répondre aux besoins du gestionnaire de réseau).

La rentabilité sera principalement assurée grâce à la revente de la production d'énergie verte aux entreprises, aux établissements d'enseignement et/ou de recherche et aux particuliers présents sur le site, à l'optimisation tarifaire de leur approvisionnement énergétique et à une offre élargie de services de modulation, d'effacement et d'efficacité énergétique active.

L'une des voies qui permettra d'accroître significativement le taux de pénétration des sources renouvelables variables est celle proposée par le projet RennesGrid®, qui consiste à développer sur la zone d'activité précitée (où le tertiaire est fortement représenté) une production électrique photovoltaïque renouvelable représentant une proportion importante de la consommation (environ 25 %), une forte proportion d'autoconsommation grâce à une gestion intelligente, une politique active de réduction des consommations des abonnés (évaluée à environ 25 %) et, plus globalement, un modèle d'affaires

original gagnant-gagnant (pour la société par actions exploitante et les abonnés).

En conclusion, une forte autoconsommation de la production électrique renouvelable locale associée à des actions incitatives de MDE permettra :

- sur le plan économique, de développer un véritable savoir-faire de filière dans une dynamique de croissance au niveau national et international. En effet, le projet, de nature préindustrielle, doit permettre de construire une solution répliquable, portée par des PME et des grandes entreprises françaises, pour des quartiers existants ou nouveaux, et ainsi d'intéresser rapidement un marché significatif ;
- au niveau sociétal, de donner une visibilité certaine au territoire concerné et à ses engagements dans la transition énergétique et l'innovation au niveau national, voire à l'international. Les conséquences positives des innovations réalisées en termes de services et d'offres tarifaires peuvent en effet devenir un élément important de rayonnement et d'attractivité des territoires ;
- sur le plan social, de lutter contre les problématiques de précarité énergétique et de maîtrise des données ;
- enfin, sur le plan environnemental, de réduire les émissions de CO₂ (d'environ 434 tonnes/an à l'horizon 2025, soit une réduction d'environ 20 % par rapport à 2017) et les consommations d'énergie fossile.

La maîtrise de l’empreinte énergétique des services informatiques et des réseaux en entreprise

Par Laurent BENATAR

Directeur technique d’Orange France en charge des réseaux et des systèmes d’information

Le secteur des télécommunications est la colonne vertébrale de la révolution numérique. Grâce à des progrès technologiques rapides, chacun peut désormais disposer partout de connexions permanentes, peu onéreuses et offrant des débits toujours plus élevés. Cette disponibilité est une réelle opportunité pour le développement durable de l’ensemble de la société. Pour un opérateur de télécommunications certifié ISO 14001 comme l’est Orange, la maîtrise des impacts environnementaux qui en résulte est cependant un véritable enjeu. Celle-ci commence dès la conception des produits et des réseaux, dans un secteur où les renouvellements des matériels sont fréquents et les investissements élevés. Une grande attention est accordée à la gestion au quotidien des déchets d’équipements électroniques et de la consommation d’électricité. Grâce à ses efforts continus, Orange parvient à des résultats encourageants, par exemple en réduisant fortement les consommations d’énergie rapportées à chaque usage.

Le secteur des télécommunications, la colonne vertébrale de la transition numérique

Une transition ancienne vers le numérique

Les télécommunications ont été parmi les premiers utilisateurs des technologies numériques. Le besoin de transmettre des conversations téléphoniques sur de grandes distances, et ce sans distorsion du son, a conduit à la généralisation de la « modulation par impulsion et codage » (MIC) dans les années 1980. On qualifierait aujourd’hui cette modulation de « numérisation du signal audio ». La recherche française en pointe dans ce domaine a ensuite introduit la technique de la commutation électronique temporelle, un premier mariage entre l’informatique et les télécommunications. Les avancées dans le domaine des communications numériques se sont alors succédé à un rythme soutenu, avec la télématique (le Minitel), les réseaux numériques à intégration de services (RNIS), pour tous les publics, et des réseaux de transmission par paquets, pour les entreprises.

On peut dater du milieu des années 1990 le développement des deux grandes évolutions technologiques qui ont permis la constitution du substrat nécessaire à la transi-

tion numérique : il s’agit bien sûr d’Internet, qui s’appuie sur le protocole IP (véritable langage universel), et, par ailleurs, de la téléphonie mobile (GSM ou 2G).

Rapidement, le besoin de disposer d’un débit beaucoup plus élevé est apparu, l’ADSL et l’UMTS (3G) ont toutes deux apporté des réponses à cette attente. Cette forte hausse des capacités de communication s’inscrivait donc avant tout dans une démarche économique et commerciale.

Des progrès durables

Mais cette croissance fulgurante des débits offerts a également été rendue possible par une recherche constante de sobriété dans l’utilisation des ressources. Ainsi, par exemple, l’efficacité spectrale s’est fortement accrue à la fois en termes de bits transportés par hertz et de consommation électrique des réseaux (par hertz). De la même manière, le remplacement des câbles en cuivre par des câbles optiques permet des gains sur de nombreux points : l’énergie utilisée pour la transmission d’un bit diminue de plusieurs ordres de grandeur ; l’encombrement des conduites de génie civil est fortement réduit ; et, enfin, l’architecture des réseaux est simplifiée par l’accroissement des distances de transmission.

Une offre abondante, permanente et disponible partout

Les capacités de communication fixes et mobiles installées par les différents opérateurs permettent aujourd'hui à tout un chacun de disposer partout (le cas échéant, par satellite) d'un accès permanent à haut débit (allant couramment jusqu'à 1 gigabit par seconde (Gbit/s) sur la fibre et 150 mégabits par seconde (Mbit/s) avec un mobile 4G).

Cette abondance à des coûts de plus en plus abordables favorise l'émergence de services numériques toujours plus variés : au-delà des communications interpersonnelles (sous des formes multiples, y compris de type visioconférence), on peut citer les accès au *Web*, à des bouquets de chaînes de télévision ou de radio, à des jeux en réseaux, à des modes de paiement dématérialisés et, aujourd'hui, à des relations directes entre objets ou entre « machines » (les serveurs informatiques).

Des impacts contrastés sur l'environnement

Il est indéniable que les réseaux de télécommunications permettent de réduire significativement les besoins de déplacements et de courriers papier. La simple observation de la réduction du volume de lettres transportées par La Poste atteste de cet impact. Le temps passé en réunions téléphoniques professionnelles ou en communications avec nos proches illustre aisément les gains que nous faisons en termes de déplacements. Il est indéniable, cependant, que les besoins de communication ont explosé, pouvant être facilement satisfaits par une offre de réseau abondante, permanente et disponible partout. La maîtrise des impacts environnementaux de l'ensemble des réseaux, y compris des équipements terminaux installés chez les clients, est donc un enjeu majeur pour les opérateurs.

La maîtrise des impacts environnementaux chez Orange

Des impacts environnementaux significatifs

Pour un opérateur de réseaux comme l'est Orange, deux préoccupations environnementales spécifiques ressortent très nettement : d'une part, la gestion des déchets issus des équipements électriques ou électroniques, mais aussi de matériels plus spécifiques comme les câbles, et, d'autre part, la maîtrise de sa consommation d'énergie, principalement d'électricité (nous aborderons plus loin ces deux aspects).

D'autres points sont également importants et sont donc à surveiller : les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) de ses plus grands sites, sa consommation de papier, historiquement forte pour les factures, la réduction de ses émissions de CO₂ liées aux déplacements en automobile, par exemple (ces aspects étant moins spécifiques à l'activité d'opérateur de réseaux de télécommunications, ils ne font l'objet ici que d'une simple mention).

Une volonté de maîtriser les impacts environnementaux

Depuis de nombreuses années, Orange est engagé tant

au niveau du groupe (de dimension internationale) qu'en France dans une démarche de certification ISO 14001. L'ensemble des activités réalisées en France est d'ailleurs certifié dans ce cadre depuis juin 2016, après une montée en charge progressive qui s'est étalée sur plusieurs années.

En outre, dans le sillage des engagements pris au niveau du groupe lors de la COP21, un programme ambitieux de réduction de nos consommations d'énergie est en place, avec en particulier l'objectif d'une certification ISO 50001.

Des actions sont également impulsées pour promouvoir l'économie circulaire ou pour mieux connaître le cycle de vie de nos produits et de nos réseaux. Elles montrent que la phase de conception est une étape clé pour la maîtrise des impacts environnementaux.

Relever les défis environnementaux dès la phase de conception

L'attention que nous accordons à l'environnement doit être permanente dans l'ensemble de nos activités et sur toutes nos chaînes techniques et applicatives. Une efficacité environnementale est cependant beaucoup plus grande lorsqu'elle est prise en compte dès la conception des équipements et des systèmes. En voici plusieurs exemples.

Des box bien conçues

Le développement des accès haut débit s'est accompagné de l'introduction, chez les clients, de boîtiers de connexion habituellement appelés « box ». Il peut s'agir de dispositifs d'interface, par exemple pour disposer d'un routeur WiFi ou d'un téléphone, ou de décodeurs pour recevoir les chaînes de télévision. Ces boîtiers sont largement répandus, la maîtrise de leurs impacts environnementaux est donc une préoccupation majeure.

La première étape consiste à conduire une analyse du cycle de vie du produit (ici, la box) pour bien appréhender l'ensemble des points qui doivent être pris en compte. Un point important est la consommation électrique de l'équipement. Celle-ci peut d'ailleurs représenter un coût non négligeable pour le client. Une conception privilégiant la sobriété énergétique est nécessaire. Le client doit aussi pouvoir éteindre sa box quand il le souhaite.

Un autre point d'attention est celui de l'emballage : le superflu est, là encore, à éliminer. Il est ainsi possible de réduire le volume des déchets, ce qui simplifie d'ailleurs la vie des clients. La réduction de la taille des contenants permet également de mettre davantage de produits sur une même palette, et donc de diminuer les impacts environnementaux liés au transport. Le choix du carton permet, quant à lui, de favoriser des filières de commercialisation responsables sur le plan environnemental.

Enfin, il est important de signaler que la phase de conception doit également intégrer le recyclage de l'équipement arrivé en fin de vie. En cas de retour suite à une panne ou suite à la résiliation d'un abonnement, les produits sont conçus pour pouvoir être facilement testés, réparés, remis en état et reconditionnés.

Dans l'avenir, les opérateurs à l'instar d'Orange s'orienteront vers la virtualisation de certaines fonctionnalités actuellement assurées par leurs box. Celles-ci ne seront plus assurées par les box, mais dans le « réseau », à distance. Ainsi, elles ne seront activées (et, donc, ne consommeront de l'énergie) que lorsqu'elles seront utilisées !

Une 4^{ème} génération très sobre

Dans le domaine des télécommunications, les générations de matériels et les technologies utilisées pour construire les réseaux se superposent ou se chevauchent dans le temps. C'est d'ailleurs une spécificité du métier d'opérateur que de pouvoir faire fonctionner ensemble tous ces équipements, et de gérer leur évolution. On aurait pu craindre que l'arrivée des réseaux mobiles de 4^{ème} génération ne se traduise par un simple rajout de matériels et donc par une consommation énergétique fortement accrue. Le dialogue entre les fabricants d'équipements et les opérateurs a en réalité permis de dégager des solutions beaucoup plus satisfaisantes.

Ainsi, des opérations d'échange (*swap*) ont été conduites pour remplacer des équipements 2G ou 3G déjà installés. Les nouveaux matériels consomment beaucoup moins d'électricité que les anciens et regroupent les ressources communes. Ils ont aussi rendu plus aisée l'installation de la 4^{ème} génération, tout en limitant l'impact énergétique sur les sites concernés.

Les bandes de fréquences utilisées ont nécessité la création de nouvelles antennes-relais pour assurer une bonne couverture géographique. Leur bonne intégration paysagère, mise en œuvre dès l'origine et adaptée au contexte, a permis de satisfaire l'aspiration de nos concitoyens en matière de non-pollution visuelle.

La nécessité de traiter des déchets des plus variés et répartis sur tout le territoire

Les terminaux des clients

Les terminaux hors d'usage des clients sont traités comme des déchets d'équipements électriques et électroniques ménagers. Le cas des téléphones mobiles requiert une attention toute particulière. Il en existe plusieurs dizaines de millions en France à ce jour, et ils sont périodiquement renouvelés. Au-delà des obligations légales de récupération, plusieurs initiatives peuvent être engagées par les opérateurs et les distributeurs. Les incitations financières à la reprise d'un appareil sont un dispositif qui existe dans de nombreux domaines. La mise à disposition de conteneurs dédiés auprès de collectivités permet également de renforcer les démarches écoresponsables. Il convient cependant de constater que le taux de retour n'a pas encore atteint le niveau attendu, et ce malgré la panoplie des actions engagées. Une initiative intéressante est à signaler : c'est celle mise en œuvre par Orange et qui vise à recycler des téléphones portables dans certains pays émergents, en particulier en Afrique. Lorsque ces « terminaux » sont encore en état de fonctionner, il est en effet possible de leur donner une seconde vie sur le marché d'occasion de ces pays. Pour compléter ce dispositif,

une filière de retour de ce type d'appareil a été mise en place afin de ne pas exporter vers ces pays émergents les déchets produits dans nos pays développés.

Les équipements actifs du réseau et les équipements informatiques

Les équipements du réseau et les équipements informatiques utilisés en très grand nombre par les opérateurs sont eux aussi, lorsqu'ils sont arrivés en fin de vie, des déchets d'équipements électriques et électroniques. Le traitement approprié de plusieurs milliers de tonnes de ces déchets collectés sur l'ensemble de notre territoire nécessite une démarche structurée. Il convient également de noter que ces équipements peuvent contenir des informations sensibles, en particulier des données personnelles des clients. La destruction de ces données est un préalable impératif à la mise au rebut des équipements considérés.

Les câbles

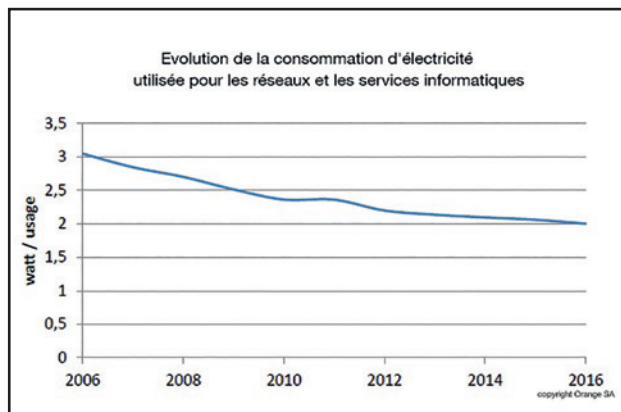
Le remplacement des câbles en cuivre par des câbles en fibres optiques a commencé il y a de cela plus d'une vingtaine d'années, pour ce qui concerne les liaisons inter-centraux. La disparition (ou la bascule) des derniers liens routés sur ces supports permet aujourd'hui de récupérer ces câbles en cuivre (plus rarement en plomb). Plusieurs dizaines de milliers de tonnes de câbles ont ainsi été retirées des conduites de génie civil ces dernières années, dans l'objectif d'un recyclage. Le déploiement des réseaux de fibres optiques jusqu'au domicile des abonnés (FTTH) laisse à penser que des perspectives s'ouvrent pour la poursuite active du retrait des câbles en cuivre des boucles locales.

Maîtriser la consommation d'énergie

Une consommation par service en forte baisse

Les équipements de télécommunications ont un rythme d'évolution proche de celui de l'informatique. En outre, leur consommation baisse tendanciellement. L'innovation dans le domaine des services y est également très dynamique. Il en résulte que les nouveaux services offerts ont une consommation énergétique de plus en plus faible. Les services historiques étant supportés par des équipements anciens – certains ont plus de 30 ans –, la maîtrise de la consommation moyenne par service dépend de la gestion au quotidien de ces équipements : il s'agit de regrouper les usages pour libérer les capacités devenues inutiles, d'arrêter d'alimenter électriquement les matériels désaffectés, de régénérer des lots de maintenance par récupération. On distingue trois catégories de sites pour cette gestion, en fonction de leur taille. Les différents types de matériel sont regroupés pour procéder à cette analyse, en fonction de leur consommation énergétique.

Il est à noter que si l'on rapporte la consommation électrique à l'ensemble des services délivrés (on comptera ainsi trois services pour une offre « *triple play* », par exemple), l'on constate une baisse continue de cette consommation sur une longue période. C'est là un objectif de performance énergétique qui vient conforter l'engagement pris



Évolution de la consommation d'électricité utilisée pour les réseaux et les SI*.

* SI = système informatique.

par le groupe Orange de diviser par deux ses émissions de CO₂ rapportées à l'usage de ses services en 2020 par rapport à 2006, l'année de référence.

Un grand nombre de petits sites

Il y a sur l'ensemble du territoire français plusieurs dizaines de milliers d'antennes-relais ou de petits bâtiments abritant des répartiteurs du réseau fixe, dans des zones plus rurales. Le nombre élevé des sites concernés et la faible modularité des équipements réduisent les leviers d'action. Les règles d'ingénierie et le choix des équipements sont des points clés pour maîtriser la consommation d'électricité. Par ailleurs, une exploitation régulière permet de s'assurer du fonctionnement conforme des équipements.

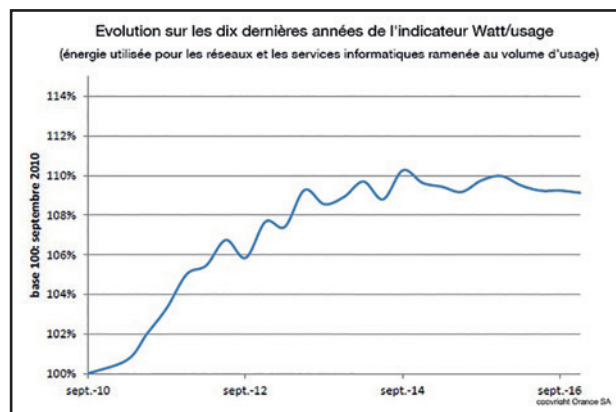
Un millier de sites intermédiaires

Ces sites intermédiaires sont implantés dans les agglomérations, soit pour les desservir, soit pour assurer la collecte du trafic des sites plus petits. Ils ont souvent été construits à l'époque de l'automatisation du réseau téléphonique. Comme les centraux électromécaniques nécessitaient beaucoup de place, ils sont aujourd'hui, dans beaucoup de cas, surdimensionnés. La gestion de l'espace, l'aérodynamique, le dimensionnement et le paramétrage des systèmes de climatisation, et le suivi des taux de remplissage des équipements sont eux aussi des points clés. La moindre place occupée permet d'envisager des techniques plus économes, telle la ventilation forcée. Ces sites ont des évolutions plus fréquentes, qui requièrent une exploitation plus systématique.

Quelques très gros sites

Quelques très gros sites concentrant les équipements constituent le « cœur de réseau ». Ces sites assurent les fonctions centrales de routage et hébergent les plateformes de services. L'évolution des réseaux vers la virtualisation des fonctions, et donc vers le portage de traitements de plus en plus nombreux sur des serveurs informatiques banalisés, va amener une large convergence de ces sites avec les *data centers* du monde informatique. La maîtrise de la consommation électrique est un enjeu essentiel pour les *data centers*. Malgré une forte croissance des fonctions assurées par ces sites, leur consommation électrique globale a diminué. L'attention

© Orange S.A.



Évolution sur les dix dernières années de l'indicateur watts/usage (énergie utilisée pour les réseaux et le SI ramenée au volume d'usages).

portée au choix de leurs emplacements, à la construction d'une solution technique ultramoderne qui privilégie la ventilation par rapport à la climatisation, a été un élément déterminant. Mais c'est bien l'exploitation optimisée des systèmes de refroidissement qui permet d'assurer la pérennité des gains réalisés en matière d'économie d'énergie. On mesure habituellement un taux de performance énergétique (PUE, ou *Power Usage Effectiveness*), le ratio entre la consommation électrique totale du site et la consommation des seuls équipements informatiques. Il a été possible de réduire celui-ci de 30 % dans les *data centers* de nouvelle génération.

Suite à ce premier succès, le programme pluriannuel de restructuration et de rénovation des *data centers* a été accéléré au sein du groupe Orange pour permettre une baisse encore plus importante de ce taux au cours des prochaines années.

De larges potentiels d'évolution

Les réseaux de télécommunications sont en évolution constante depuis des décennies. Mais nous entrons dans une période très particulière, car elle concentre plusieurs renouvellements majeurs qui vont intervenir dans le même temps.

La migration vers le tout-IP entraîne un désinvestissement progressif des opérateurs dans les réseaux historiques. Ce renouvellement s'accompagne du déploiement de nouveaux réseaux qui offrent des débits de transmission qui vont bien au-delà des besoins actuels (FTTH, 4G, et bientôt la 5G). De même, ces nouveaux réseaux permettent, grâce à IPv6 (*Internet Protocol* version 6) et aux technologies à faible consommation, telle que LoRa, de connecter un nombre important d'objets. Beaucoup de services de demain, qui transformeront le mode de vie de nos concitoyens, sont encore à inventer. On peut citer quelques axes touchant en particulier le domaine de l'environnement :

- des déplacements évités grâce à des dispositifs de téléprésence, de télémédecine ou l'utilisation de la réalité augmentée en vue d'un accompagnement par un expert ;

- des déplacements optimisés grâce aux outils de gestion collective des infrastructures de transport ou à des objets qui signalent directement leurs besoins ou leurs défaillances ;
- une meilleure maîtrise de la consommation électrique à la fois dans l'espace public et au domicile des particuliers, grâce à la domotique communicante ;
- une prolongation de la durée de vie des équipements en assurant une maintenance prédictive efficace basée sur une connaissance renforcée de l'état des équipements.

Et bien d'autres domaines d'emploi encore à découvrir.

Plus que jamais, les enjeux environnementaux seront donc déterminants dans les dix prochaines années, et le monde des télécommunications y jouera un double rôle : accompagner, par l'innovation, les moyens permettant d'économiser l'énergie dans la vie quotidienne et poursuivre les efforts de maîtrise de la consommation d'énergie induite par ces nouvelles technologies.

Chez Orange, nous sommes à la fois conscients de cette responsabilité et fiers de notre modeste contribution à un futur meilleur.

Glossaire

ADSL : *Asymmetric Digital Subscriber Line*, qui se traduit fonctionnellement par « liaison numérique à débit asymétrique sur ligne d'abonné ».

Boucle locale (fixe) : ensemble des câbles qui relient les points de terminaison du réseau ou, dans les locaux des abonnés, aux répartiteurs principaux de l'opérateur.

Box : boîtiers installés chez les abonnés pour assurer no-

tamment des fonctions de modem ou de décodage.

Cœur de réseau : équipements implantés dans les nœuds principaux du réseau et sur les artères à très haut débit qui les relient entre eux.

Consommation par usage : rapport de la consommation énergétique totale au nombre des usages (voix, télévision, Internet/données) liés aux accès aux réseaux fixes ou mobiles.

FTTH : *Fiber To The Home*, câble de fibres optiques allant jusqu'au domicile de l'abonné.

GSM : Groupe Spécial Mobile, standard européen du système radio-cellulaire numérique (2G).

IP : *Internet Protocol*.

Triple Play : accès fixe qui permet les trois usages suivants : transmissions de la voix, de la télévision et de l'Internet.

UMTS : l'*Universal Mobile Telecommunications System* est le système de téléphonie mobile de troisième génération.

Virtualisation : ensemble de solutions matérielles et logicielles visant à dissocier le traitement des fonctions des télécommunications des ressources physiques utilisées jusqu'ici à cette fin.

WiFi : nom commercial de la technologie IEEE 802.11x (créée et maintenue par *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, sis à New York) de réseau local Ethernet sans fil.

La place du numérique dans les feuilles de route de prospective énergétique de l'Agence Internationale de l'Énergie

Par Kamel BEN-NACEUR

Agence Internationale de l'Énergie (Paris)

Les feuilles de route de prospective énergétique ont été développées par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) en collaboration avec les secteurs publics et privés producteurs et consommateurs d'énergie. Ces feuilles de route, qui couvrent les quatre prochaines décennies, permettent de définir, dans chaque secteur énergétique, les éléments clés pour assurer un avenir compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris sur le climat. Dans ces feuilles de route, l'accent est plus particulièrement mis sur le rôle du numérique, notamment en relation avec les réseaux intelligents (*smart grids*). Les piliers de la transition vers un système énergétique plus numérique et plus intelligent y sont établis, ainsi que les conditions nécessaires à la réussite de la transformation du secteur considéré. Y sont également discutés les risques inhérents à cette transition.

Introduction

La révolution numérique a commencé dans le secteur énergétique, il y a de cela plus de quatre décennies, tout d'abord dans le secteur de la production et de la distribution de l'énergie, pour ensuite impacter progressivement l'utilisateur final (consommateurs individuels, collectivités et industries/services). Ainsi, par exemple, l'initiative « *digital oil fields* », dans le secteur des hydrocarbures, a vu le jour au début des années 1980, avec des développements technologiques, tels que la sismique tridimensionnelle et les forages horizontaux (*Offshore Technology*, 2015). Depuis, la numérisation dans le secteur amont des hydrocarbures a permis d'améliorer plusieurs indicateurs clés dans le secteur, tels que le taux de découvertes de nouveaux gisements, la sécurité opérationnelle et les taux de récupération. Dans le secteur de l'électricité, l'intégration d'une proportion croissante d'énergies renouvelables est requise, avec deux caractéristiques nouvelles : la variabilité de la production et une grande diversité du parc de génération, rendant nécessaire une numérisation accrue. Enfin, du côté des consommateurs, la diffusion des compteurs intelligents ouvre la voie à une véritable révolution dans la relation client-fournisseur.

Avec les objectifs ambitieux de l'Accord de Paris conclu en 2015 et la nécessité d'accélérer la transition énergétique, la question se pose du rôle que peut jouer le

numérique dans les secteurs tant de l'approvisionnement énergétique que de la demande d'énergie, notamment s'il est possible d'esquisser des feuilles de route permettant de décarboner le secteur énergétique ?

Les scénarios énergétiques de l'AIE

Depuis le début des années 1990, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) a développé des projections à moyen et à long termes en utilisant des modèles intégrant la consommation et la production mondiales d'énergie. Deux types de modèle sont utilisés :

- les perspectives mondiales de l'énergie (*World Energy Outlook*) (IEA, 2016a),
- et les perspectives technologiques de l'énergie (*Energy Technology Perspectives*) (IEA, 2016b).

Dans les deux cas, un scénario qui permette de limiter l'augmentation de la température à moins de 2 °C est simulé, puis comparé à des scénarios plus conventionnels correspondant soit aux politiques actuelles, soit aux politiques anticipées sur la base des contributions nationales résultant de l'Accord de Paris sur le climat.

La Figure 1 de la page suivante représente une comparaison des trajectoires des émissions du scénario 2DS avec celles du scénario des politiques actuelles (6DS). Les principales composantes de la décarbonation des

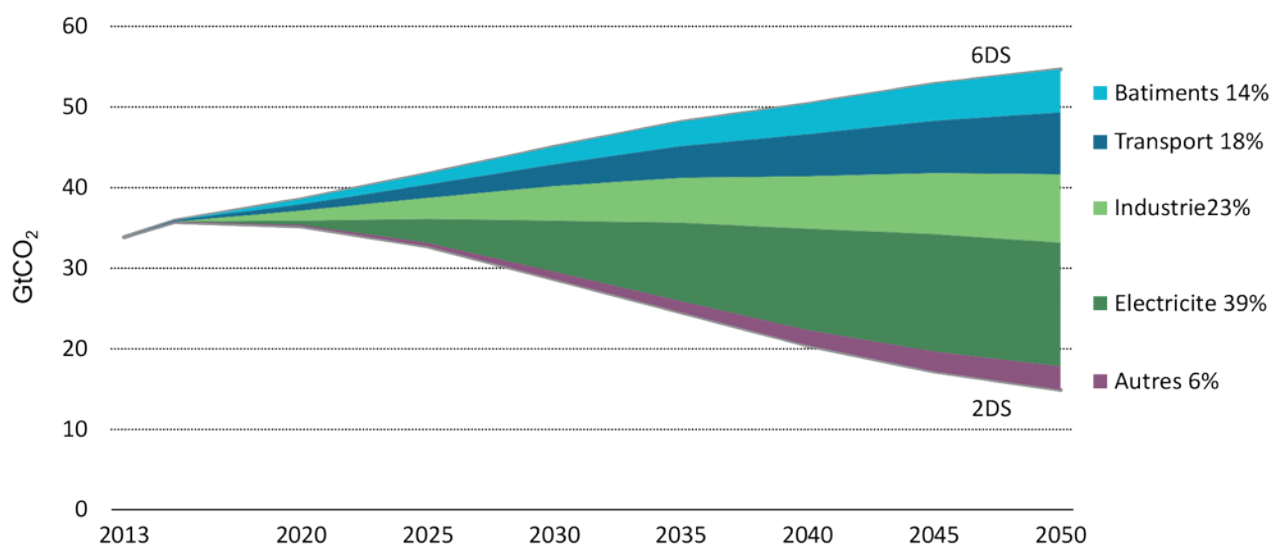


Figure 1 : Comparaison des trajectoires d'émissions entre le modèle correspondant à une hausse des températures limitée à 2 °C et les politiques actuelles (IEA, 2016b).

secteurs consommateurs d'énergie sont, par ordre décroissant : l'électricité (une réduction potentielle de 39 % des émissions totales de CO₂), suivie de l'industrie, des transports et du bâtiment. La réalisation du scénario permettant de limiter le réchauffement au maximum à 2°C nécessite une mobilisation sans précédent de ressources technologiques et financières.

Plus récemment, l'AIE a développé un scénario correspondant à une limitation du réchauffement « à bien moins de 2 °C » (IEA, 2017a), avec un effort requis encore plus important, comparé au scénario correspondant à une limitation de l'augmentation de la température à 2 °C (une analyse plus détaillée des politiques énergétiques et des technologies requises sera disponible dans la publication *Energy Technology Perspectives 2017* (2017b)).

Les feuilles de route technologiques de l'AIE

Pour faire face aux défis liés à la sécurité de l'approvisionnement énergétique, à la croissance économique et à la limitation du changement climatique, il y a une nécessité urgente d'accélérer le développement des technologies énergétiques à bas carbone. En 2008, les ministres des pays du G8, réunis au Japon, ont demandé à l'AIE de développer des feuilles de route technologiques (*Technology Roadmaps*) qui permettent une progression plus rapide des innovations précitées.

En réponse à cette requête du G8, l'Agence a développé, avec le soutien de ses pays membres, une série de feuilles de route incluant les principales technologies énergétiques. Ce processus de développement bénéficie de la participation active des secteurs publics (autorités nationales, secteurs éducatifs et recherche) et privés (entreprises, associations). Les 39 réseaux technologiques de l'AIE (*IEA Technology Collaboration Programs*) ont aussi joué un rôle clé dans la collecte des informations et la dissémination des bonnes pratiques. Ces feuilles de route

ont pour ambition de réduire les émissions à un niveau qui soit compatible avec un réchauffement climatique inférieur à 2 °C. Chacune de ces feuilles de route représente un consensus international sur des étapes clés pour le développement des technologies, sur les besoins de régulation, sur les efforts requis de communication en direction du grand public et de collaboration internationale. Les feuilles de route suivantes ont été mises au point, elles sont disponibles sur le site de l'AIE (www.iea.org) :

- la bioénergie pour la génération de chaleur et d'électricité,
- les biocarburants pour le transport,
- la capture et le stockage de CO₂,
- la production de ciment,
- les industries chimiques et les processus catalytiques,
- les véhicules électriques et hybrides rechargeables,
- l'efficacité dans le chauffage et le refroidissement urbains,
- l'efficacité énergétique dans le bâtiment,
- le stockage d'énergie,
- l'efficacité énergétique dans le transport routier,
- la chaleur et l'électricité géothermiques,
- la génération d'électricité à haute efficacité et à basses émissions,
- l'hydrogène et les piles à combustible,
- l'énergie nucléaire,
- l'électricité hydraulique,
- le photovoltaïque,
- l'électricité solaire thermique,
- les systèmes énergétiques intelligents,
- l'éolien.

En collaboration avec les pays concernés, l'AIE a aussi développé des feuilles de route nationales, comme celles relatives au développement de l'éolien en Chine, ou à la production de ciment avec émissions réduites de CO₂ en Inde.

Le numérique dans la feuille de route des systèmes énergétiques intelligents

Dans plusieurs des feuilles de route citées ci-dessus, le numérique joue un rôle essentiel. Nous avons choisi, ici, d'en illustrer l'importance à travers l'exemple de la feuille de route dédiée aux systèmes énergétiques intelligents.

Avec plus de 50 millions de kilomètres déployés dans le monde (assez pour couvrir la distance entre la Terre et Mars), les réseaux électriques constituent l'une des infrastructures existantes les plus complexes. Cependant, ces réseaux ont été gérés traditionnellement de manière unidirectionnelle, à savoir du côté de l'électricité générée dans les grandes installations de production pour l'alimentation des consommateurs, avec une très faible participation des consommateurs (côté de la demande) à cette gestion.

Alors que les réseaux ont évolué pour devenir plus intelligents au cours des trois dernières décennies, cette tendance s'est récemment fortement accélérée. Les flux de données engendrés par les systèmes électriques doublent tous les deux ans. Dans le même temps, le coût des dispositifs de télédétection et de l'informatique diminuait en moyenne de moitié tous les 30 mois, au cours des 20 dernières années. L'application du même taux d'apprentissage à l'efficacité d'un véhicule léger de 1996 aurait abouti à une autonomie de 200 000 milles (plus de 320 000 kilomètres) en 2016 ! Les TIC et le monde de l'énergie évoluent à des vitesses très différentes. Or, ils doivent de plus en plus interagir.

Un système énergétique plus intelligent, car plus numérisé, émerge des tendances actuelles. Mais la maximisation de son potentiel, l'accélération de la transition et l'atténuation des risques inhérents à la transition nécessitent une sensibilisation et une action accrues des divers secteurs et parties prenantes concernés. Des systèmes énergétiques plus intelligents nécessiteront le déploiement de

nouvelles infrastructures pour les secteurs d'utilisation finale (les réseaux électriques, de gaz ou de chauffage urbain), ainsi que dans la génération d'électricité et dans divers types de dispositifs tels que les capteurs électroniques et les systèmes informatiques. Parallèlement, cela nécessitera leur interconnexion *via* des réseaux de communication à grande vitesse à l'aide de protocoles standardisés mêlant les mondes des TIC et de l'énergie.

La feuille de route des systèmes énergétiques intelligents de l'AIE vise à évaluer de manière globale l'impact des technologies intelligentes et des TIC sur le système électrique à l'horizon 2050, ainsi que les options s'offrant aux décideurs pour gérer la transition énergétique en évaluant les défis, les obstacles et les étapes requises pour opérer le déploiement de ces nouvelles fonctionnalités en temps opportun.

Fondamentalement, la transition vers un système d'énergie plus numérique et plus intelligent repose sur trois piliers :

- **Les données provenant des capteurs et des compteurs.** Les capteurs disséminés tout au long du système énergétique (cela va des compteurs intelligents installés dans les maisons jusqu'aux capteurs des centrales électriques ou des grands équipements industriels) génèrent d'énormes volumes de données ;
- **Le contrôle d'une plus grande partie du système énergétique.** La communication bidirectionnelle permet de contrôler à distance de grandes quantités d'équipements relevant du secteur de l'énergie ;
- **L'analyse des données et le « Big Data »** permettent de développer notre capacité d'apprentissage à partir des données brutes et d'application, notre intelligence pour concevoir, contrôler et exploiter plus efficacement les systèmes énergétique.

À chaque fois que ces trois piliers sont combinés dans un secteur ou une application, l'adoption de réglementations appropriées permet l'émergence de nouveaux modèles de *business* et de solutions qui, fondamentalement, a) aug-

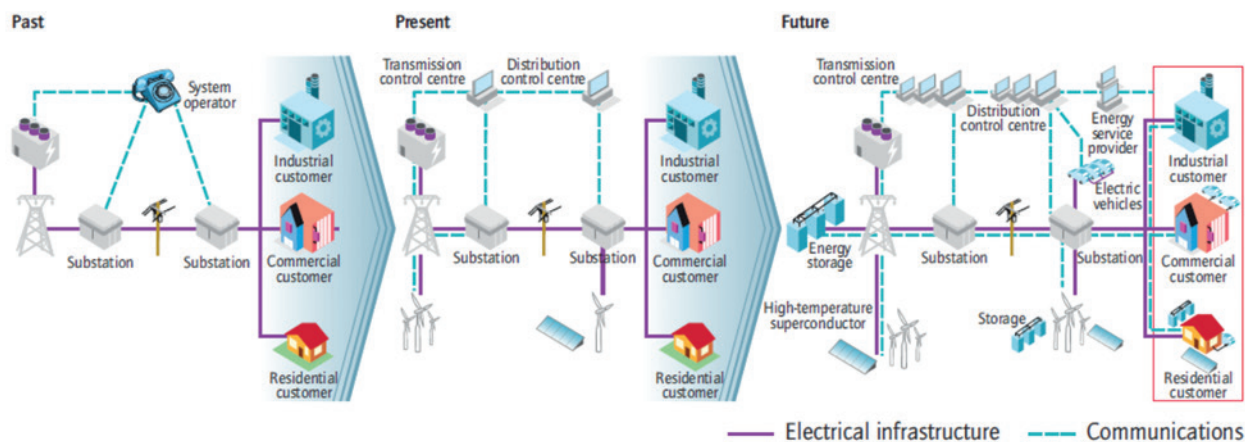


Figure 2 : L'évolution de l'infrastructure électrique et le rôle du numérique (IEA, 2011).

mentent l'utilisation des actifs courants, b) diminuent les coûts et augmentent l'efficacité et c) ouvrent la possibilité d'intégrer de nouvelles sources d'énergie, comme l'électricité stockée dans les batteries des véhicules électriques, la génération distribuée, le chauffage et le refroidissement intelligents ou des appareils électroménagers sobres. La feuille de route de l'AIE *Smart Energy Systems* (systèmes énergétiques intelligents) identifie les domaines clés qui possèdent un potentiel important de numérisation tout au long de l'horizon temporel des scénarios de l'AIE. La Figure 2 de la page précédente montre l'évolution de l'infrastructure électrique, depuis les systèmes monodirectionnels et concentrés du passé jusqu'aux systèmes multidirectionnels, distribués et intelligents actuels.

Dans les réseaux de distribution, à l'échelle locale, une plus grande intelligence des systèmes énergétiques permise par les TIC permet d'optimiser leur surveillance et leur contrôle. En particulier, les données et leur analyse permettent un suivi en temps réel des opérations de distribution, et cette intelligence ouvre des possibilités de prévision des pannes et de la maintenance réalisée à distance. En outre, ces réseaux plus intelligents permettent un plus grand contrôle sur les centrales électriques et sur d'autres actifs, ainsi que sur les flux d'électricité. Ils peuvent permettre d'anticiper des modèles plus performants, ainsi que les variations de la demande et les vulnérabilités du réseau, et réagir ainsi quasi automatiquement aux pannes.

Dans les réseaux de transmission, à des échelles plus élevées, de nouvelles technologies à très haute tension permettent la connexion de nouvelles ressources énergétiques distribuées et une plus grande interconnexion entre les réseaux. Des capteurs de meilleure qualité améliorent également l'information sur l'état du réseau, ce qui permet de renforcer les systèmes énergétiques intelligents afin d'améliorer la capacité physique du réseau. Enfin, la digitalisation des réseaux d'énergie réduit la nécessité de construire de nouvelles lignes électriques ou d'investir dans des actifs matériels physiques.

Au niveau de l'utilisateur final, les plus grandes opportunités de numérisation concernent des applications portant sur le « bord du réseau ». Les systèmes énergétiques intelligents peuvent faciliter la participation des consommateurs à la gestion des systèmes énergétiques grâce à l'apport d'une réponse adaptée à la demande, aux appareils intelligents, à la recharge des véhicules électriques... tout en permettant aux consommateurs d'accueillir de plus grandes quantités de génération distribuée autoproduite et de stockage. La flexibilité de la demande peut augmenter considérablement la capacité globale du système à héberger de l'électricité intermittente produite par des sources d'énergie renouvelables et par d'autres sources d'énergie propre. Elle permet aussi de déployer un plus grand nombre de véhicules électriques et l'électrification du chauffage, du refroidissement et de l'industrie, et de réduire généralement les coûts.

Néanmoins, la transition vers les systèmes énergétiques numériques comporte aussi des risques qui devront être

gérés. Tout d'abord, la confidentialité et la sécurité des données apparaissent comme une préoccupation majeure. La confidentialité et la sécurité des données des consommateurs soulèvent de nombreuses questions : quelles données seront essentielles et prioritaires, et pour quelles parties prenantes ou quels secteurs ? Qui pourrait posséder les données acquises à partir de compteurs, de capteurs, etc., et qui devrait y avoir accès ? Quelle est la meilleure façon de répondre à ces préoccupations en mettant en balance les avantages provenant de nouveaux modèles commerciaux et des solutions qui nécessitent que ces nouvelles sources de données soient développées ?

Ensuite, le paradigme des systèmes énergétiques intelligents nécessite le support d'un système de TIC complexe, ce qui peut accroître les vulnérabilités et le potentiel d'attaques informatiques. Des stratégies de cybersécurité de « bout en bout » du système énergétique doivent être développées, ce qui suppose de la part des acteurs concernés une prise de conscience considérablement accrue de l'importance de la cybersécurité.

La feuille de route de l'AIE *Smart Energy Systems* identifie aussi certains risques clés liés à 1) la gestion de solutions et de processus qui devront traiter d'importants volumes d'informations, 2) l'hétérogénéité des composants, des protocoles et des systèmes mis en place dans les systèmes énergétiques actuels, qui n'ont pas été construits en tenant compte de l'interopérabilité, mais qui doivent fonctionner de manière systématique et 3) des vitesses de changement différentes entre les TIC et les technologies du système énergétique, l'évolution beaucoup plus rapide des premières faisant peser un risque de déphasage. Enfin, 4) s'impose la nécessité d'une coordination transfrontalière beaucoup plus importante que celle qui existe aujourd'hui dans le secteur de l'énergie.

Bibliographie

IEA (2017), *Perspectives for the Energy Transition*, https://www.energie.wende2017.com/wp-content/uploads/2017/03/Perspectives-for-the-Energy-Transition_WEB.pdf

IEA (2017b), *Energy Technology Perspectives 2017*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2016a), *World Energy Outlook 2016*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2016b), *Energy Technology Perspectives 2016*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2011), *Technology Roadmaps – Smart Grids*, OECD/IEA, Paris.

OFFSHORE TECHNOLOGY (2015), "A history of the digital oil field": <http://www.offshore-technology.com/features/featurea-history-of-the-digital-oil-field-4436910/>

Numérique et écologie

Par **Françoise BERTHOUD**

Directrice du GDS EcoInfo, LPMMC, UMR 5493, CNRS/UJF

Juxtaposer dans une même phrase « numérique » et « écologie » n'est pas neutre. Il règne dans nos sociétés une croyance dans le pouvoir quasi magique du numérique d'être à même de résoudre les défis écologiques. Certes, nous sommes tous plus ou moins conscients que la consommation énergétique des équipements impliqués n'est pas négligeable et qu'il convient d'y prêter une attention particulière, de même qu'aux déchets générés, mais cela ne modifie en rien notre croyance collective ni nos actes. Entre vocabulaire flou, informations parcellaires ou simplifiées à l'extrême, contrevérités et idées reçues, il est difficile de se faire une idée précise de l'état de nos connaissances sur les impacts environnementaux des technologies numériques. C'est pourquoi il semble nécessaire aujourd'hui d'en revenir à des éléments factuels et d'éviter de précipiter une nouvelle catastrophe écologique. Il convient surtout de penser le numérique comme un outil d'aide à la transition écologique en restant conscients des défis qu'il s'agira de relever dans le monde numérique lui-même.

Dans cet article, nous proposons un éclairage critique sur quatre idées fausses ; cette démarche nous donnera l'opportunité de revenir sur les informations les plus critiques relatives aux impacts négatifs des TICs.

Une société basée sur les échanges d'informations a une empreinte écologique négligeable

Dématérialisation, virtualisation, *cloud*, information, réseaux, données, simulation, avatars, réalité virtuelle, *smartgrids*, e-objets, courriels... sont autant de termes empruntés au champ lexical de l'informatique. Clairement, ces mots teintés d'intelligence nous éloignent de la réalité physique, tangible, mobilisant des ressources, quant à elles, bien réelles et générant des polluants définitivement non virtuels. Pourtant, les estimations de consommation d'électricité des technologies de l'information et de la communication (TICs), dans leur ensemble, sont de l'ordre de 10 % de la consommation totale, aujourd'hui, au niveau mondial. Ces 10 % se répartissent approximativement entre 30 % pour les *data centers*, 30 % pour les équipements terminaux des utilisateurs (principalement les ordinateurs) et 40 % pour les réseaux de télécommunications. Les prévisions indiquent que cette consommation devrait globalement continuer à augmenter d'environ 7 % par an. L'augmentation de la part des *data centers* et des réseaux est essentiellement provoquée par la multiplication des services offerts par le *Cloud* (notamment le stockage des données), et donc des équipements les hébergeant. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux TICs ne sont pas en reste, puisqu'elles représentent aujourd'hui entre 2 et 5 % de l'ensemble des GES émis sur la planète, soit plus que l'ensemble de l'aviation civile.

De plus, l'empreinte écologique d'un produit ou d'un service ne se limite pas aux questions énergétiques et aux impacts climatiques pendant sa phase d'usage. L'industrie des TICs s'appuie en effet sur des équipements et des infrastructures à haute valeur ajoutée, dont les caractéristiques sont relativement constantes :

- L'empreinte écologique de ces produits est fortement marquée par l'utilisation de très nombreux métaux, dont un grand nombre de métaux rares (au sens géologique) et/ou critiques (aux sens géologique, économique et géopolitique). Ainsi, par exemple, un simple *smartphone* concentre à lui seul quelques dizaines de métaux différents, dont au mieux, en fin de vie, dix-sept d'entre eux feront l'objet d'une valorisation jusqu'au stade de la récupération du métal lui-même. Les autres métaux seront, quant à eux, dispersés et perdus. Or, les géologues estiment qu'au rythme actuel de consommation, les réserves d'argent, d'indium, de galium ou de germanium sont de l'ordre d'une quinzaine d'année seulement (voir le Tableau 1 de la page suivante).

Dans ce tableau, une réserve représente une quantité géologiquement identifiée, extractible avec la technologie disponible aujourd'hui, tenant compte de la valeur économique actuelle du métal et estimée sur les bases de la consommation présente et prévisible. Ces valeurs sont donc à prendre avec précaution. Cependant, la réalité d'aujourd'hui est que la concentration des métaux (cuivre, or, argent, par exemple) est en moyenne en di-

	Argent	Cuivre	Indium	Galium	Germanium	Lithium	Tantale	Terres rares
Usage	Contacts	Câbles	Écrans	Leds	Wifi	Batteries	LCD, condensateurs	LCD, aimants
Part de la production mondiale dédiée aux TICs	21 %	42 %	>50 %	40 %	15 %	20 %	66 %	20 %
Réserves (ans)	15-30	40	10-15	10-15	10-15	grandes	150	grandes
Recyclage	>50 %	>50 %	<1 %	<1 %	<1 %	<1 %	<1 %	<1 %

Tableau 1 : Exemples de métaux utilisés dans les TICs et les enjeux associés (DREZET, 2012 ; VIDAL, 2016) ⁽¹⁾.

minution dans les nouveaux gisements découverts. La question des métaux est donc un enjeu majeur pour ces technologies.

- Dans un scénario d'utilisation moyen, la phase de fabrication des équipements nécessaires au traitement et à l'échange d'informations (*smartphones*, ordinateurs, serveurs, équipements de stockage, etc.) concentre à elle seule entre un quart et plus des trois-quarts de leurs impacts environnementaux. La phase de transport est significative pour le fret aérien, et la phase de recyclage est très mal estimée aujourd'hui, même dans un pays industrialisé comme la France. Les données sont manquantes ou entachées d'un important niveau d'incertitude. Quant à la phase d'usage, il faut souligner qu'elle a fait l'objet de progrès très significatifs. Pour autant, compte tenu de l'explosion des volumes de données, du nombre des applications, de la taille des logiciels et de nos besoins en applicatifs, on n'observe pas de réduction globale de la consommation électrique.

Ces constats motivent trois conclusions préliminaires :

- Plus que jamais, il convient de faire attention à l'arbre qui cache la forêt ;
- Il est urgent de prolonger les durées d'utilisation des équipements afin de réduire les prélèvements de ressources non renouvelables, ainsi que les impacts liés à leurs phases de fabrication et de recyclage ;
- Les effets induits et rebond desquels résulte une augmentation de la consommation, suite à une réduction des limites à l'utilisation d'une technologie (par exemple : diminution de prix, réduction de la consommation d'énergie), risquent à eux seuls d'annuler les bénéfices attendus des progrès réalisés.

Le télétravail permet de réduire l'empreinte carbone

Éviter les déplacements en voiture pour se rendre à son travail tous les jours, à l'heure où il paraît plus économique d'utiliser les technologies de l'information pour travailler chez soi, paraît être une excellente voie pour agir sur l'environnement. Mais ce serait passer sous silence de nom-

breux aspects négatifs qui annulent en partie les bénéfices escomptés :

- Travailler à domicile suppose de chauffer sa maison, et d'y prévoir un espace de travail (une pièce supplémentaire), et donc d'augmenter les impacts liés à l'habitation ;
- Il n'est ni envisagé ni souhaitable que les salariés passent 100 % de leur temps de travail à leur domicile, mais plutôt de l'ordre de 2 jours sur 5. Or, cela n'engendre pas de réduction significative des impacts liés aux locaux professionnels, ni en surface ni en consommation énergétique ;
- Le télétravail conduit nombre de salariés à opter pour un environnement plus propice à une meilleure qualité de vie, ce qui les amène le plus souvent à s'éloigner de leur lieu de travail et donc à augmenter la distance à parcourir les jours travaillés dans l'entreprise ;
- Les déplacements secondaires (courses, déplacements scolaires, etc.) deviennent primaires les jours de télétravail, induisant donc malgré tout des émissions de GES.

Au final, en tenant compte de l'ensemble des conditions et des effets induits qui ont fait l'objet de plusieurs études, les bénéfices du télétravail sont largement inférieurs à ceux escomptés : selon les périmètres, les hypothèses, les scénarios et les pays, l'ordre de grandeur du gain potentiel (sur les GES) est de 0,1 à 0,5 %. Autrement dit, compte tenu des incertitudes sur les données utilisées et dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de conclure que l'apport des TICs dans le développement du télétravail soit « écologique » (sans compter qu'il faudrait aussi tenir compte des problématiques liées à la porosité de la frontière vie professionnelle/vie personnelle et des risques de perte de cohésion des collectifs de travail).

Aujourd'hui, on recycle les déchets d'équipements électriques et électroniques à hauteur de 80 %

C'est un chiffre trompeur qui, de plus, dépend de ce que l'on entend par « recyclage ». Selon les règles de

(1) Voir www.ecoinfo.cnrs.fr

la directive européenne sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) et d'après l'Ademe, 80 % des DEEE français sont en effet indiqués comme ayant été recyclés dans les filières réglementées⁽²⁾.

Mais regardons plus en détail ce que ce chiffre de 80 % recouvre. Ce taux est calculé à partir du tonnage collecté des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) qui ont subi un traitement de dépollution, puis de broyage et de tri, rapporté au tonnage de DEEE collectés. Rappelons, à ce stade, que le tonnage collecté correspond seulement aujourd'hui à environ 45 % des déchets générés. Quant aux opérations dont il est question, leurs produits se présentent sous la forme de différentes fractions (fractions de plastiques plus ou moins triés selon leurs propriétés physicochimiques, fractions de cartes électroniques, fractions de composés ferreux et non ferreux, etc.). Dès lors que ces fractions quittent le site de l'opérateur, le déchet est considéré comme « recyclé ». Or, entre ces fractions et les matériaux qui pourraient repartir dans une filière de fabrication, il y a une importante différence, surtout pour les matières plastiques et de nombreux métaux présents en très faibles quantités dans les équipements. La valorisation d'une fraction n'implique pas nécessairement la récupération de plastiques pour refaire du plastique. Même pour des métaux relativement faciles à recycler, il y a des pertes importantes dans le processus (de l'ordre de 5 % en poids pour l'aluminium, par exemple). En réalité, cet indicateur ne rend pas compte du recyclage tel que l'utilisateur peut l'imaginer. Pire, on ne sait pas, aujourd'hui, mesurer précisément (jusqu'en bout de chaîne) les taux de valorisation matière des déchets électroniques générés (y compris dans un pays comme la France).

Deux conclusions s'ajoutent aux précédentes :

- Il est nécessaire, en tant qu'utilisateurs d'équipements électriques (et donc générateurs de déchets), d'utiliser les points de collecte spécifiques (points de collecte dans les magasins et lieux publics, points DEEE des déchetteries, etc.), y compris pour les petits équipements ;
- Ce n'est pas parce qu'un déchet électronique est dans la bonne filière de recyclage que ses matériaux vont être la source de nouveaux équipements équivalents. On est très loin, aujourd'hui, d'une boucle (au sens de l'économie circulaire) dans le cycle de vie de ce type de produits.

Les technologies de l'information et de la communication (TICs) permettront en 2030 d'économiser au moins l'équivalent de 10 fois leur propre impact

De nombreux travaux prospectifs ont été publiés ces dernières années. Ils ont fortement mobilisé les acteurs politiques et industriels dans le sens d'un encouragement à développer davantage les outils numériques. Ces études concluent en effet à un potentiel important de réduction des GES d'autres secteurs (d'un facteur allant de 5 à 10). Citons par exemple les études SMART2020 et 2030, ainsi



Cycle de vie d'un produit : de l'extraction des métaux au traitement en fin de vie. Une très faible fraction des matériaux qui entrent dans la composition des nouveaux équipements est issue du recyclage de produits divers.

qu'une étude de la Fédération française des Télécoms, l'Alliance TICS et la Fédération des industries électriques, électroniques et de communication. Globalement, ces études ont proposé d'évaluer et de comparer aux horizons 2020 ou 2030 (par rapport à la situation actuelle) :

- les empreintes liées aux impacts directs négatifs d'une partie des TICs, essentiellement des objets « end-user » comme les ordinateurs ou les téléphones, ainsi que les *data centers* et le réseau ;
- les empreintes liées aux impacts indirects positifs de ces mêmes TICs appliquées à différents usages ou secteurs : la dématérialisation, la mobilité, les bâtiments, les réseaux énergétiques, voire l'industrie et l'agriculture.

Mais un examen plus attentif de ces études met en évidence un certain nombre de limites et d'incertitudes importantes ; il s'agit donc de travaux exploratoires plutôt que d'études prospectives robustes. La prise en compte de leurs résultats dans des choix politiques/stratégiques relève dès lors d'un pari sur l'avenir, avec une prise de risques d'autant plus importante que ceux-ci sont mal évalués.

Citons quelques limites critiques de ces études, à titre d'illustration. Seul l'indicateur correspondant au potentiel de réchauffement climatique est évalué, les autres indicateurs environnementaux, comme l'épuisement des ressources non renouvelables, sont ignorés.

Par ailleurs, certaines phases du cycle de vie sont totalement omises, ou très partiellement prises en compte (approvisionnement/fabrication et fin de vie, notamment). Les scénarios sont construits sur un modèle « au fil de l'eau » dans un monde sans limites écologiques et biophysiques. Les hypothèses posées consistent en des agrégations is-

(2) <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/registre-eee-donnees-2015-201610-rapport-annuel.pdf>

sues de sources variées : agences publiques, industriels, rapports d'études, organisations internationales, dires d'experts, etc. De même, les données sectorielles sont souvent extrapolées à d'autres secteurs géographiques, sans analyse de leur robustesse. Ne sont pris en compte ni les effets induits négatifs ni les effets rebond, qu'ils soient positifs ou négatifs. Ces limites affaiblissent les conclusions des études, et ce d'autant plus que, selon le rapport 2017 des Chiffres clés du climat ⁽³⁾, l'évolution de l'empreinte carbone par Français a retrouvé en 2015 le même niveau qu'en 1995, mais avec une inversion des poids relatifs de CO₂ du territoire métropolitain par rapport au CO₂ importé (sous la forme, par exemple, de produits manufacturés) : 35 % importés en 1995 contre 55 % en 2015, ce qui tend à mettre en évidence un transfert de pollution plutôt qu'une réduction.

En conclusion, au travers de ces exemples, nous avons voulu montrer comment une communication simplifica-

trice, la diffusion de conclusions peu robustes d'études exploratoires auprès de décisionnaires et de politiques à la recherche d'un nouveau souffle pour la société et le choix d'un vocabulaire associé à un imaginaire volontairement épuré des réalités matérielles sous-jacentes nous rendent collectivement inconscients des conséquences de ce type de choix. Or, le numérique pourrait constituer un levier pour la transition écologique, pour peu que les comportements des utilisateurs, les stratégies de *marketing* des constructeurs et les connaissances de chacun soient éclairés sur tous les plans, et pas seulement en fonction de nos désirs et de nos pulsions.

(3) http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2016/chiffres-clés-du-climat-edition2017-2016-12-05-fr.pdf

Photo © Michel Viaia/PhotoPCR- La Dépêche Du Midi/MAXPPP



Envie 2, société située à Portet-sur-Garonne, recycle des appareils électroménagers et électroniques usagés. Elle fait partie du réseau Envie, lequel, notamment au travers d'une activité de rénovation et de revente d'appareils électroménagers et électroniques, participe à la réinsertion de personnes éloignées du monde de l'emploi.

« Dès lors que les fractions d'objets ou de matières quittent le site de l'opérateur, le déchet est considéré comme "recyclé". Or, entre ces fractions et les matériaux qui pourraient repartir dans une filière de fabrication, il y a une importante différence, surtout pour les matières plastiques et de nombreux métaux présents en très faibles quantités dans les équipements. »

Numérique et recherche environnementale : quelles évolutions ?

Par François JACQ

Président de l'alliance de recherche AllEnvi

et Benoît FAUCONNEAU

Secrétaire exécutif d'AllEnvi

La recherche environnementale est confrontée à des enjeux d'autant plus forts que les diverses transitions environnementales impliquent une approche systémique et qu'une attention particulière soit accordée aux interfaces et aux couplages. En regard, les sciences du numérique sont le support d'une compréhension de plus en plus fondée sur la modélisation, la maîtrise de la donnée et l'algorithmique. Les deux domaines s'interrogent mutuellement, se nourrissant de questions et d'approches partagées. Pour les prochaines années, enjeux et opportunités renvoient à un triptyque : la maîtrise des systèmes complexes et de leur représentation à des échelles multiples (temporelles comme spatiales) ; la réponse au défi de données proliférantes, difficiles à exploiter et à contrôler, mais aussi source de nouvelles perspectives ; et l'instrumentation de l'appui aux politiques publiques.

Empruntons à la météorologie deux instants clés de son histoire. Au tournant du XIX^e siècle, la flotte anglo-française subit en Crimée une sévère tempête qui l'affaiblit considérablement. Urbain Le Verrier, directeur de l'Observatoire de Paris, aurait alors proposé à l'Empereur Napoléon III la constitution d'un bureau de la météorologie susceptible de prévenir de telles catastrophes. Un suivi, de proche en proche, de la traversée du continent par la tempête eût en effet conduit, selon lui, à donner l'alerte (nous sommes alors à l'ère du télégraphe, celui-ci offrant une possibilité de circulation et de maîtrise de l'information⁽¹⁾).

Passons aux quarante dernières années. La prévision du comportement de l'atmosphère a connu des progrès spectaculaires, que l'on résume couramment en disant que la qualité des prévisions s'améliore d'une journée tous les dix ans. Le déclencheur réside cette fois dans l'essor de la modélisation numérique, soutenu par une progression continue de la capacité des outils informatiques et des grands calculateurs.

Ces deux exemples, certes réducteurs, illustrent le lien entre la recherche sur l'environnement et les moyens de maîtriser ou de traiter l'information. Du coup, serions-nous aujourd'hui face à une révolution, comme on l'entend souvent ? Est-ce une question de nature des transformations, ou de degré dans celles-ci ?

On assimile parfois, de manière un peu hâtive, la recherche actuelle en matière d'environnement à la réponse aux enjeux soulevés par la transition environnementale. Cette notion recouvre de multiples facettes : climatique, énergétique, écologique, alimentaire... Bien que relevant d'approches distinctes, ces dernières ne sont pas indépendantes, elles interagissent entre elles, appelant une approche systémique.

Si la recherche environnementale ne se résume pas à la transition climatique, cette dernière pointe une caractéristique majeure commune : le besoin d'une approche holistique pour comprendre, prédire, anticiper l'évolution du climat, de la biodiversité, des différents compartiments du système Terre, mais aussi développer les écotechnologies, maîtriser la gestion des territoires... Le tout, dans un contexte de crise où les modifications de l'environnement, sous l'effet de l'action de l'homme (l'ère de l'anthropocène⁽²⁾), se manifestent de manière aiguë, avec un risque de rupture des équilibres (extinctions massives d'espèces

(1) Pour une vision plus historique, voir : Fabien LOCHER (2008), *Le Savant et la Tempête. Étudier l'atmosphère et prévoir le temps au XIX^e siècle*, Presses Universitaires de Rennes, Collection « Carnot ».

(2) "A Global Perspective on the Anthropocene, *Science*", vol. 334, n°6052, octobre 2011, p. 7 et pp. 34-35.

animales et végétales, transformation climatique radicale en cas de dépassement de la limite des 2 °C de réchauffement, extrême vulnérabilité des sociétés face aux risques anthropiques...).

Or, pour appréhender ces transformations, la recherche environnementale doit disposer d'une capacité d'intégration, de mise en regard des différents phénomènes, de saisie de leurs interactions, de maîtrise des interfaces, de prise en compte d'une large gamme d'échelles de temps et d'espace (allant du mondial au local) appelant à la fois une diversification des observations, une capacité de modélisation inconnue jusqu'ici, dans un souci de compréhension, de prédiction et d'action⁽³⁾.

De surcroît, les sciences de l'environnement nécessitent, dans un même mouvement, d'appréhender le comportement des acteurs et de s'enrichir de l'analyse de leurs pratiques. L'approche ne saurait seulement reposer sur un « simple » regard physique ou biologique, mais devrait également s'efforcer d'intégrer les diverses formes du rapport à la vie et à l'environnement. À titre d'illustration, les formes très variables du rapport au sol et au territoire, telles qu'elles sont étudiées par l'anthropologue Philippe Descola, montrent à quel point il n'existe pas de modèle unique dans les rapports entre les collectifs qui occupent notre planète⁽⁴⁾.

En somme, la recherche environnementale affronte la nécessité de donner un sens à des phénomènes multiples dont les mécanismes de rétroaction à l'échelle planétaire ou régionale interrogent les limites de notre capacité d'appréhension et de traitement de l'information.

En regard, quels sont aujourd'hui les grands traits propres aux sciences et aux technologies du numérique ? Par numérique, nous entendons ici les principales disciplines structurant ce champ : l'informatique, l'automatique, la robotique, le traitement du signal et des images, les télécommunications et l'électronique, mais aussi les liens avec les mathématiques ou la modélisation. Sans prétendre à une analyse fine des mouvements qui bouleversent le domaine, on retiendra cependant quelques traits pertinents pour notre propos : le « numérique » connaît depuis une quinzaine d'années une accélération qui va de pair avec une masse de données de plus en plus considérable assortie de ses capacités de collecte et de traitement, d'un progrès ininterrompu des machines associées, d'avancées régulières dans le domaine de l'algorithmique et de tout ce qui peut faciliter la modélisation, sans parler des capacités d'apprentissage des machines, que l'on regroupe, de manière simplificatrice, sous l'expression « intelligence artificielle »⁽⁵⁾.

La mise en regard des deux tendances parle d'elle-même : les besoins de la recherche environnementale trouvent, en miroir, des opportunités nouvelles dans les progrès numériques, non sans d'ailleurs susciter des interrogations sur la pratique scientifique elle-même, comme on le verra avec les cas de la maîtrise des flux de données et de leur qualification.

Parcourons quelques champs d'interaction pour mieux appréhender les pratiques actuelles⁽⁶⁾.

Le point de départ le plus évident est celui de la compréhension, de la modélisation et de l'analyse de l'environnement et de ses complexités. Depuis quelques années se développe une interaction entre les disciplines afin d'appréhender les processus humains, biologiques, physiques, chimiques..., à des échelles de temps et d'espace multiples. La compréhension des évolutions actuelles impose de coupler divers compartiments de la Planète (géosphère, hydrosphère, atmosphère, biosphère) afin d'aboutir à une représentation qui reflète mieux les processus en cause. On sait ainsi que l'interaction océan-atmosphère et sa meilleure représentation de même que l'interaction atmosphère-biosphère continentale sont des clés pour des progrès dans la prédiction météorologique et climatique.

Ce travail appelle des outils numériques, déterministes ou probabilistes, ainsi que des infrastructures pour les déployer, qui sont de plus en plus complexes et exigeants. Comme dans notre exemple météorologique initial, la simulation numérique est un outil central, que ce soit d'ailleurs pour représenter ou décrire, ou simplement pour dessiner des scénarios, des tendances par rapport auxquels il faudra réagir ou réfléchir à la description des futurs possibles, afin de les éviter ou, au contraire, de les faire advenir.

Cela vaut pour de nombreux champs : l'eau (océanographie, hydrologie), l'atmosphère (météorologie, climat, pollution), les agroécosystèmes (biodiversité, agriculture), les sociétés (villes, transports)... Le couplage de modèles à différentes échelles est une voie de progrès majeure de la recherche. La nécessaire prise en compte des comportements humains introduit un degré de complexité supplémentaire, à la fois parce qu'il est nécessaire de prendre en compte des boucles de rétroaction, mais aussi du fait de la difficulté des modélisations couplées.

De plus, afin de maîtriser l'incertitude, les outils de l'assimilation de données (préparation des données pour les rendre les plus adaptées possibles au modèle) ou les techniques ensemblistes (répétition de simulations, avec des fluctuations de l'état initial) irriguent les approches contemporaines.

Ainsi, la compréhension de phénomènes repose sur la modélisation et la simulation de systèmes complexes impliquant la disponibilité d'algorithmes plus performants, d'où le développement croisé d'une recherche environne-

(3) <http://www.allenvi.fr/actualites/2017/scenenvi-futurs-pour-la-planete>

(4) DESCOLA (P.), Les Usages de la Terre. Cosmopolitiques de la territorialité, cours au Collège de France, 2015-2016.

(5) On trouvera une approche beaucoup plus complète faite par l'Alliance nationale des Sciences et Technologies du Numérique Allistène, Présentation de l'Alliance, Paris, 2011 : https://www.allistene.fr/files/2011/01/ALLISTENE_Brochure-presentation.pdf

(6) On s'appuiera librement sur un rapport produit par les deux Alliances de recherche françaises Allistène et AllEnv, respectivement dédiées au numérique et à l'environnement, rapport sur les interactions entre les deux domaines, rédigé sous la coordination de Frédéric Garcia (DR Inra) et Jérôme Mars (Pr GIPSA lab, Grenoble-INP), 2015.



Photo © Pierre Gleizes/REA

Démonstration du logiciel Web « Mes parcelles » à la Chambre d'Agriculture de la Nièvre.

« La simulation numérique est un outil central, que ce soit d'ailleurs pour représenter ou décrire, ou simplement pour dessiner des scénarios, des tendances par rapport auxquels il faudra réagir ou réfléchir à la description des futurs possibles, afin de les éviter ou, au contraire, de les faire advenir. »

mentale qui vise une compréhension plus intégrée et plus fine des mécanismes et d'un travail numérique s'appuyant sur le calcul « haute performance ».

Un deuxième enjeu majeur est celui de la donnée, qui soulève des questions de multiples natures. Les progrès en matière environnementale sont tellement liés à l'observation et à l'augmentation de nos connaissances sur les écosystèmes ou sur les milieux que l'on finirait par en oublier le risque d'être submergé par la donnée.

L'essor des réseaux d'observation (que l'on songe simplement à la donnée spatiale, qui a transformé notre vision) et la multiplication des données expérimentales ont radicalement changé nos modes d'approche de l'environnement. Pour aborder ce continent de données, l'élaboration de techniques de fouille est cruciale et repose, là encore, sur les techniques numériques. Au plan international, une initiative intergouvernementale comme GEO/GEOSS (qui vise à développer un système global d'observation de la Terre fondé sur un système de systèmes nationaux ou par discipline), qui est relayée aux niveaux nationaux par des e-infrastructures portant spécifiquement sur les données et la modélisation du système Terre, a un effet structurant sur la recherche environnementale.

La donnée pose aussi la question de son traitement. Un peu à l'exemple du télégraphe, au XIX^e siècle, l'émergence de nouveaux dispositifs techniques, comme les objets connectés et les capteurs d'opportunités ou des techniques de mesure plus sophistiquées, confrontent les chercheurs à la délicate question de l'exploitation de données apportant une information nouvelle, mais ne s'insérant pas « naturellement » dans leurs modèles. Ce problème n'est pas nouveau (voir l'assimilation des données spatiales, par exemple), mais il appelle une capacité de traitement et d'insertion de la donnée dans les cadres de représentation classiques. On peut aussi envisager les capteurs sous un angle nouveau, avec un traitement incorporé de la donnée qui peut ensuite grandement contribuer à sa prise en compte : comment incorporer le maximum « d'intelligence des processus » dès le stade de l'acquisition ?

Par ailleurs, la masse de données acquise par les nouveaux systèmes d'information interroge également les procédures de validation, voire la responsabilité des acteurs. Il faut savoir comment et dans quelle mesure exploiter un ensemble d'observations éventuellement moins rigoureuses ou satisfaisantes que de coutume, mais dont

le grand nombre viendrait compenser ce défaut de qualité. Cette collecte massive rendue possible par le numérique appelle des modes d'analyse permettant d'en faire sens. Au passage, peut-on y voir une opportunité, avec la généralisation, au-delà du seul cadre de certaines sciences naturelles qui les pratiquent de longue date, de sciences participatives qui bénéficieraient d'outils adaptés de collecte, d'exploration et de représentation de ces données ?⁽⁷⁾.

La fusion de données a pour objectif de permettre une description d'ensemble d'un système à partir de mesures acquises dans divers milieux. Cela peut offrir des outils d'aide à la décision, notamment en matière de risques environnementaux, naturels ou anthropiques. Cela suppose de bâtir progressivement des bases de données qui soient à même d'irriguer les systèmes experts associés et de quantifier leurs performances.

Si l'on ajoute à ces diverses facettes l'essor d'une politique de la donnée libre (*Open Data*) qui pose de multiples questions (type de traitement de la donnée et d'exploitation de cette dernière, modèles économiques des acteurs), l'on voit que la donnée et son environnement sont bouleversés par le numérique, celui-ci transformant en retour les acteurs de la recherche, de la surveillance ou de l'observation et exigeant de nouveaux développements numériques pour maîtriser ces flux. Il conviendra d'être vigilant pour que les GAFAs⁽⁸⁾ ne viennent pas oblitérer le travail des acteurs scientifiques et techniques, garants de la rigueur de la collecte et de son exploitation, dès lors qu'ils sembleraient s'y substituer, mais n'assureraient pas pleinement la responsabilité de ce qui est produit et les exigences associées.

Reste donc à espérer que tout ceci s'insère dans une boucle vertueuse. La confiance en la donnée et en ses algorithmes d'exploitation sera de plus en plus au cœur des analyses et des débats, pour appliquer des principes éthiques et responsables. L'enjeu est bel et bien dans la combinaison entre donnée « autorisée » et donnée « de masse », pour que leur combinaison harmonieuse aille vers une compréhension croissante des phénomènes en cause par tous les publics, et non vers des débats stériles.

Troisième et dernier élément : il semble aller de soi que la recherche environnementale soit au service des politiques publiques. À l'évidence, l'effort de la recherche tend bien à éclairer les choix des décideurs ou à les alerter. Il ne faut toutefois jamais oublier la distance entre le paradigme de la recherche et les pratiques de la régulation publique. Pour prendre un exemple maritime, connaître l'océan et la complexité de ses écosystèmes est une chose, mais en dériver les outils de pilotage et de suivi, tels qu'on peut les pratiquer dans le cadre de dispositifs comme la directive cadre européenne Stratégie pour le milieu marin (DCSMM) en est une autre. On en vient donc à se poser la question d'extraire, des données ou des modèles, les indicateurs pertinents, de proposer des outils de simulation des décisions et d'assurer leur suivi dans le temps. Et, de nouveau, la puissance apportée par les développements numériques est l'élément clé pour procéder à cette formalisation, puis pour la maîtriser dans le quotidien afin

d'appréhender au plus près les indicateurs d'un bon état écologique.

Par-delà la recherche, se posent aussi des questions d'organisation, de marché et de développement économique. Des moyens mutualisés sont nécessaires pour garantir aux diverses communautés leur accès aux grandes infrastructures numériques. Parallèlement, l'exemple, bien connu en physique de l'atmosphère, de modèles « communautaires » qui rassemblent les acquis d'un champ disciplinaire, pour représenter son ou ses objets, a vocation à se développer et permettre à tous de mieux mutualiser et partager leurs savoirs.

De manière plus économique, l'enjeu de la donnée est aussi celui des acteurs qui s'en saisiront et sauront s'y faire une place, en matière non seulement de surveillance environnementale, mais aussi de restauration et de gestion du bon état de l'environnement. En effet, ces différentes évolutions sont aussi source d'innovation, par exemple en matière de technologies de valorisation et d'intelligence des données et d'Internet des objets, aux côtés d'approches plus classiques (tels que les capteurs, le diagnostic...).

En France, deux Alliances de recherche sont particulièrement concernées : d'une part, Allistene, pour les sciences de l'information (informatique, électronique embarquée, traitement du signal et de l'image, sciences humaines et sociales) et, d'autre part, AllEnvi, pour l'environnement (agro-écologie, aménagement des territoires, sciences de la Terre, de la mer ou du climat, biologie, écologie, physicochimie, sciences économiques et sociales...). Ces deux Alliances ont d'ores et déjà mené des réflexions communes qui mériteraient d'être amplifiées, y compris en allant vers des équipes interdisciplinaires qui soient à même d'appréhender, d'une part, les diverses facettes de l'imbrication entre les domaines de ces allers-retours permanents entre la donnée et son traitement et, d'autre part, les questions que se posent mutuellement les disciplines.

Les objectifs de développement durable (ODD) constituent désormais un des cadres de référence pour appréhender l'état de la planète et les actions à entreprendre. Nombre d'entre eux sont en interaction étroite avec la recherche environnementale. S'ils n'en sont pas le programme, celle-ci peut néanmoins apporter les éléments qui nourrissent leur déclinaison. En filigrane de ces objectifs se profile aussi la nécessité d'une étroite complémentarité entre les sciences de l'environnement et les outils de traitement et d'acquisition des données et de représentation issus du monde numérique. Cela revient à dire que, pour faire face aux crises qui sont devant nous, une alliance est indispensable, qu'il ne faut la considérer ni comme une évidence ni avec passivité, mais comme une conquête indispensable pour pouvoir inaugurer d'autres formes de compréhension et de pratiques.

(7) Les Sciences participatives en France, rapport réalisé sous la direction de François Houllier (2016), Paris.

(8) Google, Apple, Facebook, Amazon.

La photonique (la maîtrise de la lumière) au cœur de la transition écologique

Par Karl GEDDAMUDROV

Directeur général d'Opticsvalley, accélérateur de *business* et d'innovation de la *hightech*

La photonique réinvente notre vie en étant au cœur de la transition écologique : ville durable et intelligente (optimisation de la consommation d'énergie, production d'énergie renouvelable, optimisation énergétique des infrastructures de télécommunications), usine du futur (procédés moins consommateurs de matières premières, plus précis et plus propres). L'apport de la photonique *via* la réalité augmentée et la numérisation permise par les capteurs optiques non seulement abonde en ce sens, mais nous permet de concevoir des produits plus respectueux de l'environnement (*éco-friendly*) sur des sites qui le sont eux-mêmes. Et de nous propulser bien au-delà dans la disruption et de substituer à notre mode de production de masse des modes de production individualisés.

La photonique⁽¹⁾ réunit les technologies qui permettent de générer, émettre, transmettre, moduler, amplifier, détecter tout ou partie d'un signal lumineux. Pour simplifier, elle peut être scindée en trois grandes fonctions : la lumière qui apporte couleurs et tons – c'est-à-dire l'image – donc, notre représentation de la réalité qui nous entoure ; la lumière qui apporte la dynamique énergétique (originelle ?), dont les formes et les signaux peuvent être modulés ; et, enfin, la lumière qui apporte la force dont la maîtrise permet d'interagir avec la matière pour la moduler, l'assembler ou la détruire (lasers pour soigner ou produire, impression 3D...). Ainsi, la photonique s'est immiscée partout dans notre vie. Depuis 2009, la Commission européenne l'a promue comme une technologie clé, mais plus encore comme LA⁽²⁾ technologie clé la plus à même de répondre aux challenges de notre société de par son potentiel d'innovations.

La lumière est l'énergie originelle et fondamentale de notre univers et est en tant que telle intimement liée au développement durable⁽³⁾. Après tout, quoi de moins polluant que la lumière ? Quoi de plus précis que le photon ? Les innovations photoniques apportent des solutions qui concernent tout autant la réduction de notre consommation d'énergie (notamment celle induite par le très énergivore stockage des données lié à la transition numérique) que la production d'énergies renouvelables. La ville intelligente est durable. Elle s'appuiera sur un réseau de fibres et de capteurs photoniques pour détecter les risques environnementaux ou sécuriser nos déplacements.

Mais l'impact le plus important de la photonique, en termes de transition écologique, réside dans la modification de nos outils de conception (réalité augmentée, simulation virtuelle) et de production (laser, spectroscopie, capteurs). Pas étonnant donc qu'en 2008 le taux de croissance de la « photonique verte » ait été évalué à plus de 500 % pour la période 2008-2020⁽⁴⁾.

L'impact sociétal de cette technologie en fait une source de renouvellement créatif et entrepreneurial en relation notamment avec la transition écologique et la transition numérique⁽⁵⁾. En Île-de-France, ce sont de trente à quarante entreprises qui se créent chaque année. Ce sont principalement leurs produits qui serviront pour illustrer (ci-après) comment la photonique peut permettre de basculer vers une logique économique et industrielle plus durable. C'est le rôle du *cluster* Opticsvalley que de faciliter la croissance de ces *start-ups*, mais également d'identifier les solutions photoniques qui répondent aux challenges d'une société plus connectée et plus durable. Au-delà de ses performances techniques, la photonique apporte donc des performances en termes de durabilité qui vont

(1) Photonique, définition donnée par Pierre Aigrain, en 1970.

(2) COM (2009), Photonique EU, *The Commission in its Communication "Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU"*.

(3) Développement durable (définition donnée par Gro Harlem Brundtland, en 1987).

(4) Impact green photonics, WESSLER B., 2015.

(5) Contribution stratégie régionale Opticsvalley, 2016.

bien au-delà des secteurs attendus de la dépollution et de la production d'énergie.

Dans ce cadre classique, l'apport, néanmoins, est non négligeable : 40 % de réduction d'énergie (éclairage et TIC) ⁽⁶⁾. Premier thème auquel seule la photonique peut répondre par définition, l'éclairage. Il représente en moyenne 7 % de la facture énergétique d'un foyer et de 15 à 35 % de celle d'une ville. La diversité des solutions et des chemins technologiques suivis illustrent particulièrement bien la diversité de la photonique. LED et OLED (à l'instar d'EFFILUX) ⁽⁷⁾ sont des sources lumineuses plus efficaces, diffusant une lumière de meilleure qualité. Associées à des capteurs (tel que Nexperium) ⁽⁸⁾, elles permettent d'autonomiser l'éclairage public. Mais d'autres solutions sont possibles en guidant la lumière solaire dans les bâtiments (Echy) ⁽⁹⁾ ou en s'inspirant de la nature, avec des sources fluorescentes (Glowee) ⁽¹⁰⁾. Quant à la modification de la lumière naturelle (Cascade) ⁽¹¹⁾, elle permet à l'agriculture d'adapter le spectre lumineux aux besoins des plantes cultivées et de réduire ainsi sa consommation d'intrants, tout en utilisant moins d'espace.

La photonique permet aussi de relever le double défi auquel est confronté le secteur des TIC : augmenter la bande passante, tout en réduisant la consommation d'énergie et l'impact environnemental (3 % d'une consommation d'énergie en hausse de 40 % par an) ⁽⁶⁾. Le développement de la fibre optique, au-delà de ses performances techniques, contribue à la réduction de notre bilan carbone non seulement lors de sa production, mais aussi lors de son utilisation : la consommation électrique nécessaire pour faire fonctionner un ordinateur de bureau passe de 63 à 24 watts, soit 2,5 fois moins ⁽¹²⁾. Cela n'intègre pas le développement des connecteurs optiques dans les *data-centers* (Fischer) ⁽¹³⁾, ni l'essor des puces optoélectroniques (Almae) ⁽¹⁴⁾ ou les prévisions en matière d'ordinateurs quantiques (Lighton) ⁽¹⁵⁾.

La ville intelligente sera donc photonique, et cette panoplie d'applications sera complétée par des systèmes de communication complémentaires en LIFI (Oledcomm) ⁽¹⁶⁾, par le contrôle de la pollution (Blue Industry and Science) ⁽¹⁷⁾ et des risques (Leosphere) ⁽¹⁸⁾, par une meilleure sécurité grâce aux caméras biométriques, aux caméras thermiques et à la numérisation des sites.

La dépollution des fluides par lumière pulsée (Agro Hall) ⁽¹⁹⁾ ou par rayons ultraviolets (UV) (Abiotec) ⁽²⁰⁾, l'optimisation du tri des déchets (Uzer) ⁽²¹⁾ et la production d'énergie renouvelable photovoltaïque, dont les performances vont croissantes (Solems ⁽²²⁾ ; Sun R Sun'Agri ⁽²³⁾), ou de bio-fuels à base d'algues stimulées par la lumière viennent compléter l'ensemble. Pour l'énergie solaire, dont l'objectif est d'assurer 20 % de la production d'électricité en Europe en 2020, le challenge à relever reste le passage aux cellules organiques et l'utilisation de celles-ci dans des lieux isolés ou accidentés (Zephyr Solar) ⁽²⁴⁾.

L'usine de demain – s'il en existe encore – sera également photonique. En faisant leur entrée dans les procédés avancés de fabrication, la spectroscopie, la lithographie et le laser ont amené la précision de la lumière dans

	Voir/Analyser	Transformer/ Guider	Interagir/ Analyser
Technologies de base	Camera Lidar Sensing Réalité augmentée IOT	Photovoltaïque Fibres, LED/OLED/Laser LIFI	Laser Spectroscopie Sensing IOT
Détecter la pollution & réduire les risques	Image Monitoring	Fibres	Capteurs Monitoring Drones maintenance
Réduire la consommation d'énergie Réduire la consommation d'énergie Telecom	Optimisation agricole	<i>Solid state lighting</i> TIC Fibres/LIFI/Laser Connecteurs Ordinateurs quantiques	Produits plus légers
Produire des énergies (éclairages) renouvelables		Photovoltaïque Bio-fuels Éclairage durable	
Concevoir et produire de façon plus durable (industrie)	Contrôle qualité Tri Simuler Ecrans	Composants optiques pour TIC	Laser processing Additif 3D Robot intelligent Contrôles non destructifs
Dépollution 2.0			Détruire par laser Détruire par UV

Tableau 1 : Quelques impacts de la photoniques en termes de durabilité.

le contrôle et la découpe de pièces. Mais les différents usages de la lumière amènent des disruptions, et ce, depuis la conception jusqu'à la réalisation, ce qui permet un gain d'énergie et de matière lors de la production, puis un gain d'énergie lors de l'usage grâce à la légèreté acquise par la nouvelle conception. Ces impacts sont difficilement chiffrables aujourd'hui, si ce n'est pour l'impression 3D, avec un rendement matière supérieur à 90 % (*versus* inférieur à 35 % pour les techniques d'usinage standard), ou dans certains cas particuliers (un revêtement d'un micron d'épaisseur de trop sur la carlingue d'un aéronef correspond au poids de deux passagers – Enovasense) ⁽²⁵⁾.

La photonique apporte l'intelligence d'une vision élargie au cœur de nos procédés de conception et de contrôle (au-delà du spectre humain, en s'inspirant des crevettes-mantes ou des yeux composites des insectes).

(6) *Photonics Technologies and Markets for a low carbon economy – DG Connect EU Feb 2012*

(7) <http://www.ffmpeg.fr>

(8) <http://www.nexperium.com>

(9) www.echy.fr

(10) www.glowee.fr

(11) <http://lprl.org/cascade-light-technologies.php>

(12) Fibres optiques et développement durable : le FTTO vert, MUR Jean-Michel, 2015.

(13) www.fischerconnectors.com

(14) www.almae-technologies.com

(15) www.lighton.io

(16) www.oledcomm.com

(17) www.blueindustryandscience.com

(18) www.leosphere.com

(19) www.agrohall.fr

(20) www.abiotec.fr

(21) www.uzer.eu

(22) www.solems.com

(23) www.sunr.fr

(24) www.zephyr.solar.fr

(25) www.enovasense.com

Selon la typologie des capteurs photoniques associés, cette vision permet de numériser un produit, une pièce, un bâtiment, un quartier... et, donc, de reproduire des produits devenus obsolètes, de réaliser des prototypes virtuels (Optis)⁽²⁶⁾, de simuler des produits complexes ou des aménagements urbains. Il y a donc dans ce domaine une interaction forte entre transition écologique et transition numérique. Toute surface peut être transformée en tablette pour concevoir ou partager, c'est-à-dire concevoir (Adok)⁽²⁷⁾. Cette conception est affectée également par l'évolution des procédés : les technologies d'impression 3D (Pollen AM)⁽²⁸⁾ permettent littéralement de fabriquer ce qui n'était pas pensable, et, dans le secteur médical (notamment), de personnaliser la production – donc de la rendre plus durable – pour le plus grand confort du patient. Cette intelligence de la vision se retrouve au cœur des drones et des robots autonomes (et même des robots de service comme Eos)⁽²⁹⁾, qui peuvent remplacer l'être humain dans les opérations à risques en milieux difficiles. Une intelligence qui peut à son tour être complétée par une analyse de l'image en mode *deep-learning* pour des applications des plus variées (tri, maintenance...) et une interaction instantanée (Scortex)⁽³⁰⁾.

Tout en révolutionnant les pratiques de la conception, la photonique optimise les pratiques du contrôle qualité ou de détection des risques : analyse des gaz (MirSense)⁽³¹⁾, des infrastructures (Cementys)⁽³²⁾, d'ingrédients (Greentropism)⁽³³⁾, contrôles non destructifs (sous n'importe quel angle : défauts de surface (Holo3)⁽³⁴⁾, de couleur (Seelab)⁽³⁵⁾ ; elle peut également servir à la détection des contrefaçons. Ces pratiques de contrôle par la lumière évitent à la fois d'avoir recours à la destruction de l'objet et/ou à des procédés chimiques.

Quant aux procédés de production, si l'impression 3D est un terme désormais bien connu, la lumière permet, *via* la lithographie, non seulement de réaliser des couches minces de plus en plus fines, de renforcer les matériaux par des chocs laser, mais aussi de modifier les surfaces à l'échelle du nanomètre grâce à des lasers femto-secondes (Amplitude)⁽³⁶⁾ et de remplacer ainsi des procédés chimiques tout en imitant les différents modèles de peau que la nature a créés pour définir des surfaces intelligentes et multifonctionnelles (Manutech)⁽³⁷⁾. La chaleur, plus précise grâce au *solid state lighting*, modifie aussi

les possibilités de réaliser des composites et des assemblages composites de métaux (Uwave)⁽³⁸⁾. Mais, plus encore, la lumière peut faire « pousser » des matériaux dans une logique d'auto-assemblage (comme dans la nature) ou, littéralement, nous permettre d'inventer de nouveaux matériaux (Silsef)⁽³⁹⁾. Là encore, cette approche, en permettant de créer *ex nihilo*, favorise l'utilisation à 100 % de la matière produite.

Cet ensemble de disruptions permet, *via* les *Fab-Lab*, à tout un chacun de concevoir et de produire : tout cela stimule donc à son tour le potentiel entrepreneurial et pourrait remettre en question les pratiques de production en usine fondées sur la standardisation de la qualité. Le produit unique conçu et produit sur place⁽³⁴⁾ peut ainsi faire son retour et profondément modifier notre relation à la production et à l'emploi, si les assurances trouvent une solution pour garantir les risques et la fiabilité du produit.

La photonique est donc non seulement au cœur de la transition écologique en détectant les risques, en produisant avec moins de matière et moins d'énergie, et plus localement, et en fournissant une énergie renouvelable, mais également au cœur d'une modification sociétale induite par l'évolution des modes d'apprentissage, de conception et de production qui encouragent l'entrepreneuriat et remettent en question l'organisation du *mass-market*, et donc celle des entreprises. Avec la photonique, la transition écologique renvoie aux relations humaines et au modèle de société : « Les barbares vont débarquer ! ».

(26) www.optis-world.com

(27) www.getadok.com

(28) www.pollen.am

(29) www.eos-innovation.fr

(30) www.scortex.io

(31) www.MirSense.com

(32) www.cementys.com

(33) <http://www.greentropism.com>

(34) "Green Photonics – The role of photonics in sustainable product design", Photonics 21, WESSLER B. et TOBER U., 2012.

(35) <https://seelab-spectro.com/fr/accueil/>

(36) <http://www.amplitude-systemes.com/6-t-pulse-duo-double-oscillateur-laser-femtoseconde.html?lang=2>

(37) <http://www.manutech-usd.fr/>

(38) <http://uwave.fr/>

(39) <http://www.silsef.com/>

Les services Copernicus Atmosphère (CAMS) : une révolution numérique au service de l'environnement

Par Laurence ROUÏL

Responsable du pôle Modélisation environnementale et Décision de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris)

À l'issue de près de dix ans de travaux de recherche préparatoires financés par les programmes de la Commission européenne, les services européens Copernicus de surveillance de l'atmosphère sont entrés dans une phase opérationnelle à la fin de l'année 2015 (<https://atmosphere.copernicus.eu/>). Ils proposent à tout utilisateur des prévisions, cartographies et autres données valorisées relatives à la composition chimique de l'atmosphère à l'échelle globale, à l'ozone stratosphérique, au rayonnement ultraviolet (UV) et à la qualité de l'air en Europe. La Commission européenne a délégué, en novembre 2014, au Centre européen de Prévision ECMWF ⁽¹⁾ le pilotage et la gestion de ces services opérationnels regroupés sous la bannière des CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Services*). Ceux-ci résultent d'importants travaux de recherche menés par près d'une cinquantaine d'équipes européennes exploitant tous types d'outils (modèles numériques) ou de données (*in situ* et satellite) pour élaborer des diagnostics et des prévisions à différentes échelles d'espace et de temps. Une nouvelle ère est ainsi ouverte avec la mise à disposition libre et gratuite de produits inédits par leur qualité et leur exhaustivité, focalisés sur les besoins des utilisateurs et ciblant des sujets aussi sensibles que l'environnement atmosphérique.

Présentation générale des services CAMS

Un historique

En 2015, le segment atmosphère des services européens Copernicus de surveillance de l'environnement, financés par la direction générale du marché intérieur, de l'industrie, de l'entrepreneuriat et des PME de la Commission européenne (DG GROW), voyait le jour, après plus de dix années de travaux de recherche préparatoires. Ces services, appelés CAMS (pour *Copernicus Atmosphere Services Monitoring*), sont l'une des six composantes du programme aux côtés des services en charge de la surveillance des environnements marin et terrestre, du climat, des situations d'urgence et de la sécurité de l'Union européenne (www.copernicus.eu).

Le programme Copernicus, initialement baptisé GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), et ses services s'appuient sur toutes les données disponibles

issues des réseaux d'observation *in situ* et de l'observation satellite, et sur des modèles de simulation numérique. Le programme spatial Sentinel (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>) a été spécifiquement conçu en Europe pour servir au programme Copernicus. Le premier satellite, Sentinel-1A, a été lancé en 2014 pour supporter le développement des services de surveillance de l'occupation des sols, et une vingtaine de satellites devraient être mis en orbite d'ici à 2030. Les missions Sentinel 4, 5 et 5p sont spécifiquement dimensionnées pour répondre aux besoins du CAMS et mesureront les concentrations de différents composants chimiques de l'atmosphère depuis l'espace. Sentinel 4 sera placé sur une orbite géostationnaire pour surveiller le continent européen dès le début de la prochaine décennie. Sentinel 5p (précurseur) devrait permettre de tester de nouveaux

(1) ECMWF : European Centre for medium-Range Weather Forecasts.

instruments à haute résolution dès cette année (son lancement est prévu en août 2017).

Les services Copernicus produisent un ensemble inédit de données librement accessibles et réutilisables pour développer d'autres types de services plus localisés ou sectorisés, et doper ainsi le marché de l'innovation dans le domaine de l'environnement et participer à la dynamique de la croissance verte.

Le développement et la gestion des services CAMS, tout comme ceux des services climat, ont été délégués par la Commission européenne au Centre européen de prévision météorologique à moyen terme (CEPMMT/ECMWF) localisé à Reading (Royaume-Uni). Ce centre avait coordonné la mise en œuvre de tous les projets de recherche préparatoires et pré-opérationnels, soit 4 projets de recherche financés par les programmes cadres de la Commission européenne (6^{ème} et 7^{ème} PCRD et Horizon 2020), qui ont permis de proposer, en 2015, des systèmes opérationnels de prévision, de cartographie, des réanalyses historiques et d'autres données valorisées décrivant la composition chimique de l'atmosphère à l'échelle globale, l'ozone stratosphérique, les UV et à la qualité de l'air en Europe.

Les services CAMS

Le panel des activités couvertes par les services CAMS (<https://atmosphere.copernicus.eu/>) est particulièrement large, il s'articule autour de quatre grandes thématiques :

- la composante globale, qui intègre la surveillance des gaz à effet de serre, des gaz réactifs et des aérosols responsables de la pollution atmosphérique ;
- la composante régionale (ou européenne), qui couvre les enjeux de qualité de l'air en Europe ;
- des services spécifiques, tels que l'appui aux politiques publiques de gestion de la qualité de l'air, l'évaluation des flux de gaz à effet de serre ou la surveillance des radiations solaires ;
- des services dédiés à l'évaluation des émissions de polluants chimiques dans l'atmosphère, qu'ils soient d'origine anthropique ou d'origine naturelle.

Les services, globaux comme régionaux, proposent des prévisions à 3 jours d'échéance, des analyses pour les jours précédents et des réanalyses pour les années passées de la composition chimique de l'atmosphère, respectivement à l'échelle du globe et de l'Europe. Ils s'appuient sur la mise en œuvre de modèles numériques parmi les plus avancés et régulièrement évalués, dans lesquels tous types de données d'observation sont assimilés par des techniques mathématiques complexes pour fournir le meilleur diagnostic possible des niveaux de pollution. Parmi les produits proposés, certains sont totalement inédits et ont trouvé un écho particulier auprès des utilisateurs. Ainsi, par exemple, les prévisions d'évolution des panaches de poussières désertiques (zoom sur l'Europe, voir la Figure 1 ci-contre) ou encore les émissions de feux de biomasse dans le monde (voir la Figure 2 de la page suivante) proposent des informations déterminantes pour comprendre les contributions de sources naturelles aux niveaux de particules atmosphériques auxquels les populations sont exposées. Ces informations résultent de l'ex-

ploitation de données d'observation de la Terre sur l'ensemble du globe intégrées dans des modèles de chimie atmosphérique permettant de réaliser de nouvelles cartographies. La communauté des climatologues trouvera également un intérêt dans un certain nombre d'informations, telles que des réanalyses de forçage radiatif ou de flux de dioxyde de carbone établies de la même façon pour les années passées, à l'échelle du globe, à partir d'observations et de modèles complexes.

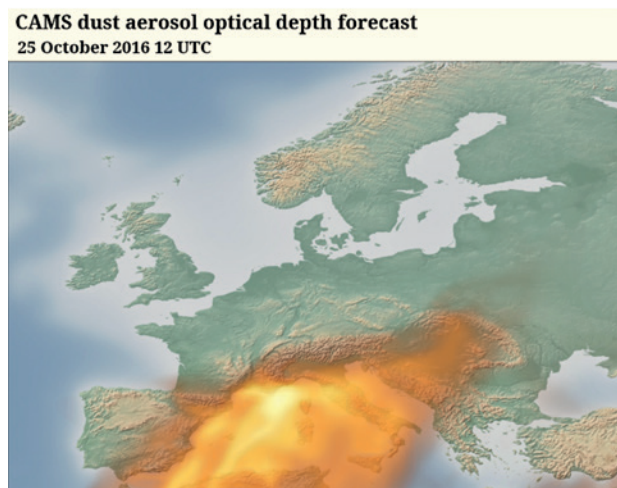


Figure 1 : Panache de poussières désertiques recouvrant une grande partie de l'Europe du Sud, le 25 octobre 2016 (Source : CAMS).

Ces services sont développés et mis en œuvre par plusieurs dizaines d'équipes, parmi les plus performantes en Europe dans le domaine de la chimie atmosphérique et de la qualité de l'air. Elles ont été sélectionnées par l'ECMWF par une procédure d'appel d'offres concurrentielle. Toutes les données issues des travaux menés dans les CAMS sont accessibles et téléchargeables sur son site *Web* au travers d'une interface conviviale, et un effort important est fourni par l'ECMWF et ses partenaires pour accompagner les utilisateurs dans l'appropriation et l'exploitation des données et pour répondre à leurs besoins spécifiques. L'objectif est non seulement de fournir prévisions et évaluations pour l'aide à la décision et pour l'amélioration des connaissances, mais aussi de faciliter le développement de produits dérivés et innovants par les PME.

Le cas particulier de la qualité de l'air

La composante dite régionale des services CAMS contribue à la connaissance de la qualité de l'air en Europe et à la gestion des épisodes de pollution atmosphérique. Il s'agit d'un domaine particulièrement sensible, puisqu'il est associé à des enjeux sanitaires faisant l'objet d'une large attention de la part du public et des médias, et est réglementé par des protocoles internationaux et des directives européennes et leurs déclinaisons dans les législations nationales des pays membres de l'Union.

Ces travaux sont coordonnés par des équipes françaises, localisées à Ineris et à Météo France, qui ont trouvé une légitimité auprès de l'ECMWF et de ses parties prenantes européennes en tirant parti, notamment, de l'expérience importante qu'elles ont acquise au cours des 15 dernières années, notamment à travers le développement et la mise

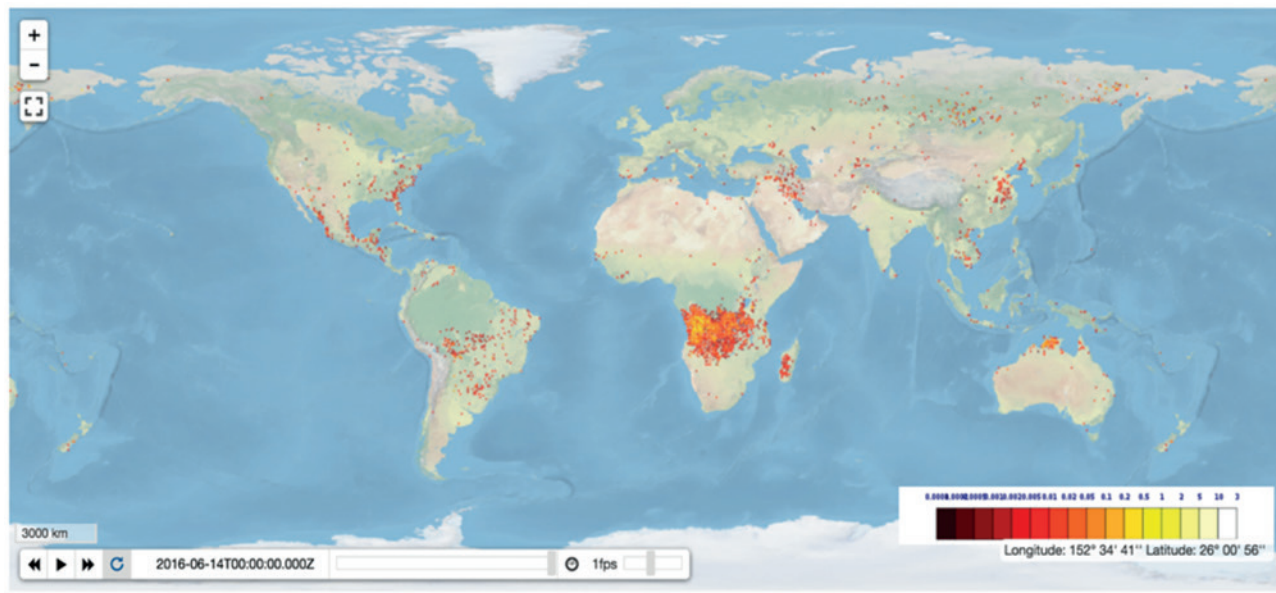


Figure 2 : Feux de biomasse détectés sur la Terre, le 14 juin 2016 (Source : CAMS).

en œuvre de la plateforme nationale de prévision de la qualité de l'air, PREV'AIR (<http://www2.prevoir.org/>).

Les services de surveillance de la qualité de l'air existant en Europe permettent tout d'abord d'accéder à une description de l'évolution des champs de concentrations de polluants atmosphériques en Europe, au travers :

- des prévisions des concentrations des principaux polluants réglementés (ozone, dioxyde d'azote, particules⁽²⁾ PM₁₀ et PM_{2,5}) en Europe jusqu'à 3 jours, et également des prévisions de concentrations de pollens (dont celui du bouleau, qui est très allergisant) ;
- des analyses en temps quasi réel de la situation de la veille ;
- des réanalyses annuelles permettant d'évaluer l'évolution de qualité de l'air en Europe et l'impact des politiques de gestion et des stratégies de réduction des émissions de polluants dans l'atmosphère.

Ces prévisions sont élaborées en combinant sept modèles de chimie-transport mis en œuvre par des équipes européennes, parmi lesquels les modèles de Météo France (Mocage) et de l'Ineris et du CNRS (Chimere). Elles bénéficient donc des atouts individuels de chacun des modèles et permettent ainsi de reconstruire les meilleures prévisions et cartographies possibles pour l'Europe, avec une résolution spatiale de 10 km. Les analyses et les réanalyses sont établies en assimilant les données d'observation issues des réseaux de mesures réglementaires implantés dans les pays européens et rapportées à l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE). Chaque modèle utilise les mêmes données d'entrée : prévisions météorologiques du CEPMMT, données d'émissions et conditions aux limites produites par d'autres services de Copernicus Atmosphère. L'originalité et la force de la démarche CAMS est l'exploitation de tous ces modèles pour produire un « ensemble » résultant de la combinaison de leurs résultats qui s'avère particulièrement robuste et d'une qualité su-

périeure à celle des modèles pris individuellement. Le service est régi par des processus particulièrement rigoureux d'assurance qualité et d'évaluation qui permettent une transparence totale sur les performances des modèles (voir la Figure 3 ci-dessous).

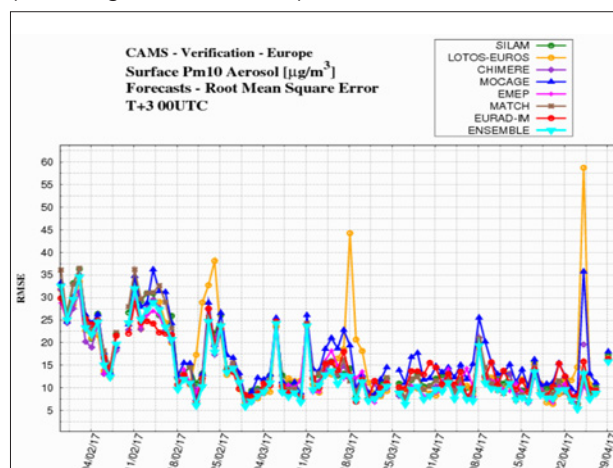


Figure 3 : Exemple d'information relative à la qualité des prévisions de qualité de l'air produites par les 7 modèles impliqués et leur ensemble. Et erreur quadratique moyenne pour les concentrations de PM₁₀ sur la période février-mars-avril 2017 (Source : <http://www.regional.atmosphere.copernicus.eu>).

L'ensemble des produits est disponible, depuis juin 2016, sur les pages du site : <http://www.regional.atmosphere.copernicus.eu>. Cette plateforme donne aux utilisateurs un accès libre et gratuit à un nombre conséquent de données et à près de 800 produits.

Dans le domaine de la qualité de l'air, d'autres produits sont proposés, notamment à destination des acteurs impliqués dans la mise en œuvre des politiques de gestion

(2) Particules de diamètres inférieurs, respectivement, à 10 microns et à 2,5 microns.

de la pollution atmosphérique en Europe – ils sont disponibles sur les pages du site : <http://policy.atmosphere.copernicus.eu/>

Ces services orientés sur les enjeux de gestion ont trois vocations principales :

- produire des bilans annuels chiffrés et des rapports d'analyse sur l'évolution de la qualité de l'air en Europe, notamment sur la base des réanalyses annuelles précédemment décrites. Ces rapports proposent un certain nombre d'indicateurs réglementaires ou représentatifs des effets sur la santé de la pollution atmosphérique (voir la Figure ci-dessous),

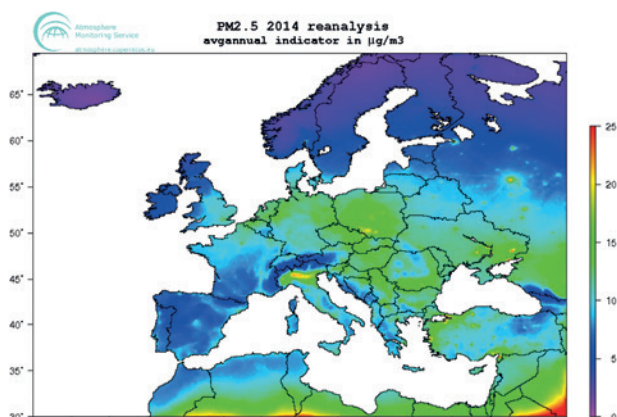


Figure 4 : Moyenne annuelle des concentrations de particules fines dans l'atmosphère de l'Europe en 2014.

- simuler quotidiennement l'effet qu'auraient sur les concentrations de polluants atmosphériques des mesures de réduction des émissions dans différents secteurs d'activité (industrie, trafic routier, chauffage résidentiel, agriculture...). L'analyse de ces résultats, présentés sous la forme de cartes d'impact, permet de qualifier les facteurs déterminants des épisodes de pollution, et donc les stratégies de gestion susceptibles de s'avérer les plus efficaces. Ces résultats rappellent que les stratégies de gestion de la pollution atmosphérique peuvent varier d'un polluant à l'autre, ainsi qu'en fonction des régions géographiques et des périodes considérées,
- simuler quotidiennement, pour les capitales européennes, la part de pollution imputable aux activités locales par rapport à celle attribuable aux pays voisins. Cette troisième application permet de disposer d'une analyse qualitative, présentée sous forme de camemberts et de séries temporelles, de la contribution du transport à longue distance des polluants atmosphériques.

Ces informations peuvent être utiles aux gestionnaires politiques pour anticiper l'efficacité des décisions qu'ils peuvent prendre. Elles les informent sur les leviers d'action nationaux ou locaux et sur les conséquences d'une action sur tel ou tel secteur d'activité. La résolution des modèles mis en œuvre ne permet pas de se focaliser sur des situations de pollutions très localisées, telles celles de la proximité des axes routiers ou de sites industriels. Elle permet néanmoins d'accompagner l'action visant à abaisser les niveaux de fond des polluants atmosphériques, et donc l'exposition chronique des populations.

Une gouvernance originale pilotée par les besoins des utilisateurs

En conclusion, les services Copernicus Atmosphere constituent une nouvelle génération de produits et de données fédérant les informations issues des réseaux d'observation *in situ*, de l'observation satellite et de modèles numériques pour mieux décrire et comprendre les facteurs influençant notre environnement atmosphérique.

Cette initiative est originale par son ampleur et les moyens alloués (elle mobilise plusieurs dizaines d'équipes de développement en Europe), par son exigence d'opérationnalité et de qualité, et par sa politique d'ouverture aux utilisateurs.

Afin de stimuler la croissance économique en Europe, un nombre inégalé de données et d'informations relatives à la qualité de l'air en Europe, mais aussi à l'échelle du globe, est mis à la disposition de tous. CAMS compte aujourd'hui plus de 5 000 utilisateurs abonnés, qui téléchargent tous les jours des données et des produits pour leurs propres évaluations ou pour développer et disséminer de nouvelles applications. Ces utilisateurs sont également une composante importante de la gouvernance du système Copernicus, lequel est largement piloté par leurs retours d'expérience et par leurs besoins. Au niveau Copernicus, un forum Utilisateurs analyse l'offre disponible et émet des recommandations, voire des requêtes sur son évolution. Le même schéma est reproduit au niveau de chaque service d'application. Ainsi, CAMS a développé une politique de communication entièrement tournée vers les utilisateurs, dédiée autant à la promotion des produits existants et à leur dissémination qu'à l'écoute des nouveaux besoins pour anticiper les futurs développements. Une base de données compilant ces requêtes est alimentée par les retours d'expérience des utilisateurs recueillis au travers d'enquêtes, d'ateliers et de sessions de formation. À terme, cette base pilotera la pérennité et l'évolution des services, ce qui constituera une nouvelle particularité du système Copernicus.

Le pari Copernicus Atmosphere a néanmoins été relevé avec la mise en place, en une dizaine d'années, de services complètement opérationnels produisant tous les jours une masse inédite d'informations permettant de décrire l'évolution de la composition de l'atmosphère dans le monde et de la qualité de l'air en Europe. Ces informations sont basées sur les outils, modèles et données les plus avancés dans l'état de l'art et répondent à de stricts critères d'assurance qualité. Ces services valorisent ainsi des travaux de recherche extrêmement poussés et illustrent les liens étroits qui peuvent être tissés entre les mondes académique, institutionnel et concurrentiel. Réciproquement, la mise en œuvre de services opérationnels et les demandes des utilisateurs mettent en exergue les incertitudes et les questions nécessitant encore un effort de recherche. Cette nouvelle dynamique ne demande qu'à se développer, dans le domaine de la surveillance de l'atmosphère comme dans les autres segments de Copernicus, pour créer une petite révolution dans les domaines de l'observation, de la simulation numérique et de la prévision fédérés au sein de services entièrement tournés vers les citoyens, de manière générale, et vers les acteurs économiques, en particulier.

Numérique et agriculture de précision

Par Jean-Paul BORDES

Directeur Recherche et Développement, Arvalis – Institut du végétal

L'agriculture de précision est un concept apparu en France au début des années 2000 avec pour objectif d'apporter « la bonne dose, au bon endroit, au bon moment ». Cette idée repose sur un constat toujours vrai, celui que toute parcelle agricole est un milieu vivant et hétérogène. Faute de matériels adaptés et de conseils agronomiques spatialisés, cette hétérogénéité est longtemps restée un handicap pour une activité agricole qui ne savait que gérer des pratiques moyennes sur chaque parcelle. La révolution numérique, qui touche aujourd'hui tous les secteurs d'activité, y compris l'agriculture, ouvre de nouvelles perspectives avec la dernière génération de capteurs et la puissance des systèmes d'information. L'agriculture de précision, renforcée par les progrès du numérique, permet aujourd'hui de transformer ce handicap en une opportunité de progrès.

Une définition élargie des concepts

Lorsque l'on parle de numérique et d'agriculture de précision, chacun met derrière ces concepts des définitions qui renvoient vers son propre référentiel et son expérience personnelle. On constate souvent que les représentations de chacun, au travers de ces termes, sont souvent plus étroites qu'elles ne le devraient. Par exemple, derrière le concept d'agriculture de précision, on met souvent l'idée de « la bonne dose, au bon endroit », qui renvoie vers ce que les agronomes appellent la modulation des intrants dans la parcelle, c'est-à-dire des systèmes de diagnostic de la variabilité intra-parcellaire liée aux caractéristiques du sol ou des végétaux associés à une application automatique de la bonne dose d'intrants nécessaire à chaque endroit de la parcelle. Cette idée n'est pas fautive, mais elle est probablement trop étroite. Il faudrait en effet ajouter à cette notion très spécifique tout l'univers des outils d'aide à la décision (se présentant d'ailleurs souvent sous une forme numérique) qui permettent aux agriculteurs de mettre en œuvre une agriculture précise ou, plutôt, de précision. Pour être plus juste sur la définition de l'agriculture de précision, il serait préférable d'utiliser la formule suivante : « la bonne dose, au bon endroit et au bon moment ». Il en va de même pour le numérique, qui devrait, avec la même logique, recouvrir les capteurs, les systèmes d'information, les bases de données, les terminaux numériques (comme les *smartphones*...), les automatismes, la robotisation, etc.

Si cette précision est importante, c'est parce que le monde agricole n'a cessé, au cours du temps, de s'appuyer sur le progrès technologique au sens large du terme pour faire progresser non seulement les conditions d'exercice de

ses métiers, mais aussi la performance globale de ses activités sur les plans économique, environnemental et social, etc. Les technologies du numérique sont perçues par le monde agricole comme un nouveau moyen pour tendre vers une agriculture de plus en plus précise (mais peut-être pas seulement).

Qu'attend-on de l'agriculture de précision ?

La première question que l'on est en droit de se poser est celle de la finalité. En quoi l'agriculture de précision est-elle un facteur de progrès ? La réponse est liée au fait que l'environnement agricole physique, en tout cas à l'échelle de l'agriculture française, est un environnement éminemment variable tant à l'échelle spatiale qu'à l'échelle temporelle. Concernant l'échelle spatiale, les agriculteurs ont déjà fait l'expérience de la variabilité des rendements au sein d'une même parcelle : ceux-ci peuvent varier assez communément du simple au double, y compris dans une parcelle réputée homogène. La Figure 1 de la page suivante représente la variabilité de la biomasse produite par un blé au stade du gonflement de l'épi, c'est-à-dire quelques jours après l'apparition de la dernière feuille. Nous pourrions avoir la même variabilité, et parfois une variabilité supérieure, au niveau du grain récolté.

La Figure 2 de la page suivante montre au travers d'un exemple que le besoin en intrant (ici le besoin en engrais azoté) peut lui aussi varier dans des proportions très importantes.

On comprend au travers de cet exemple tout l'intérêt de pouvoir adapter la dose d'engrais aux besoins réels en « tous points » de la parcelle. Les bénéfices de cette

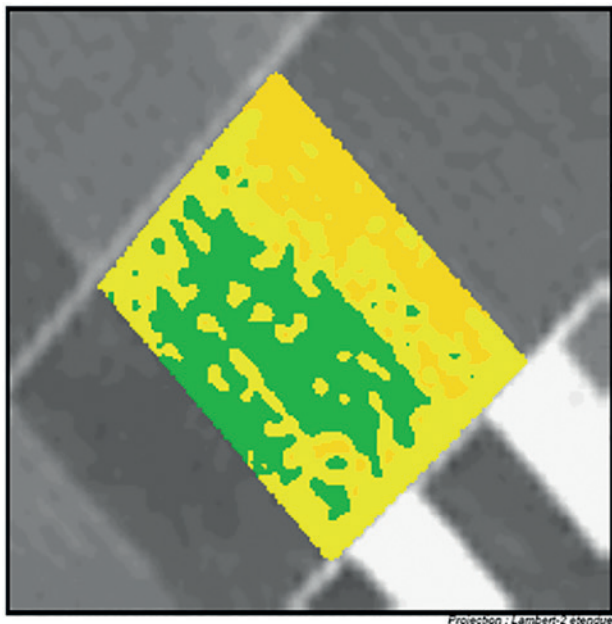


Figure 1 : Exemple, extrait de Farmstar, de la variabilité intra-parcellaire de la biomasse produite par un blé au stade « gonflement de l'épi ». L'échelle des valeurs varie de 5,4 (jaune) à plus de 7,8 (vert) tonnes de matière sèche par hectare.

adaptation sont multiples :

- une économie possible d'engrais, notamment dans les zones manifestant un besoin inférieur à la moyenne de la parcelle ;
- la possibilité, au contraire, d'alimenter plus correctement les zones qui expriment un besoin plus élevé et d'espérer ainsi un meilleur rendement et une teneur en protéines du grain plus élevée ;
- une réduction du risque de surfertilisation dans les

zones les moins exigeantes, ce qui permet de réduire considérablement les risques pour l'environnement.

La Figure 3 ci-après montre le résultat de tests effectués en plein champ visant à comparer l'application d'une dose homogène avec l'application d'une dose modulée d'engrais azoté sur du blé. L'expérimentation, conduite par C. Desbourdes en parcelles agricoles de 2005 à 2008, démontre à la fois un gain de rendement (points verts) et une économie d'azote (différence entre les bâtonnets rouges et les bâtonnets bleus).

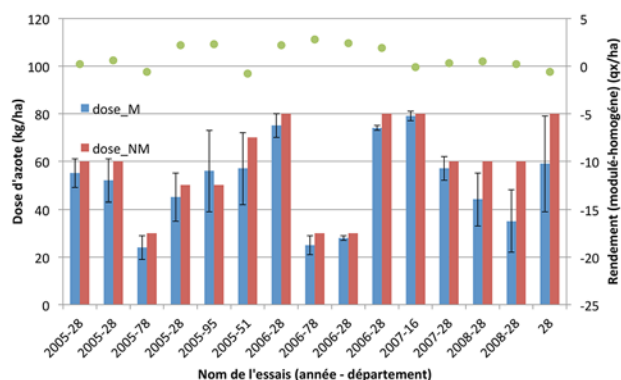


Figure 3 : Résultats d'essais au champ montrant l'intérêt de la modulation intra-parcellaire du dernier apport d'engrais azoté sur blé : économie d'azote et gain de rendement. Caroline Desbourdes, Arvalis Institut du végétal

Ces deux exemples illustrent l'intérêt d'apporter « la bonne dose au bon endroit ». À cette première notion, il convient d'ajouter l'échelle temporelle, qui précise « le bon moment » pour réaliser l'intervention. En agriculture, le choix

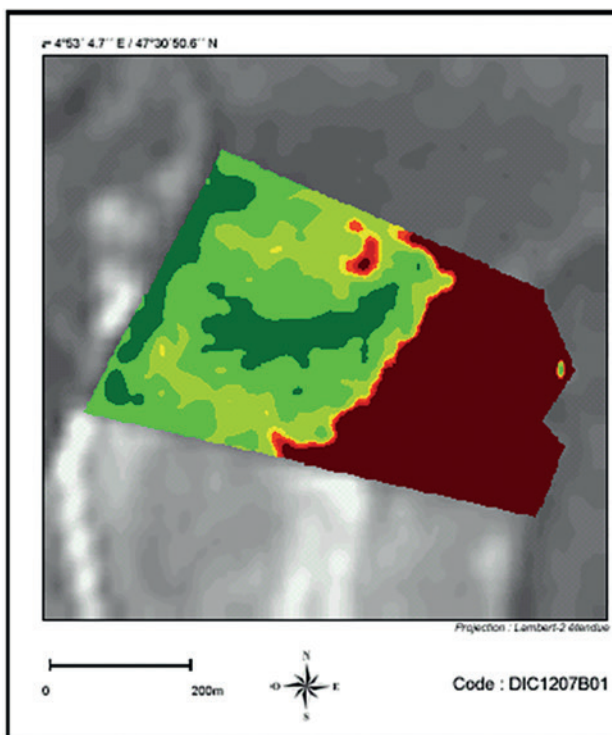


Figure 2 : Exemple, extrait de Farmstar, de besoins en engrais azoté du blé au stade « gonflement de l'épi ». L'échelle de valeur varie de 0 kgN/ha (vert) à plus de 80 kgN/ha (rouge foncé).

FARMSTAR Conseil Blé d'Hiver

Préconisation 3ème Apport d'Azote

Parcelle : Le grand champ

Surface : 21.6 ha Semis : 03/10/2003
 Variété : Soissons Densité : 400

Carte de préconisation
 Conseil au 29/04/2004

Dose	% Surface	% Surface cumulée
0	14.0	14.0
30	28.9	42.8
40	15.3	58.1
50	1.8	59.9
60	1.3	61.2
70	1.1	62.3
≥ 80	37.7	100.0

Dose recommandée 80 U

Commentaire :
 Dose recommandée pour satisfaire les besoins de la parcelle sous réserve qu'il n'y ait pas eu d'apport d'engrais dans les 20 jours précédant l'interprétation.

Prochain stade Dernière feuille pointante vers le 08/05/2004

Créneaux d'intervention

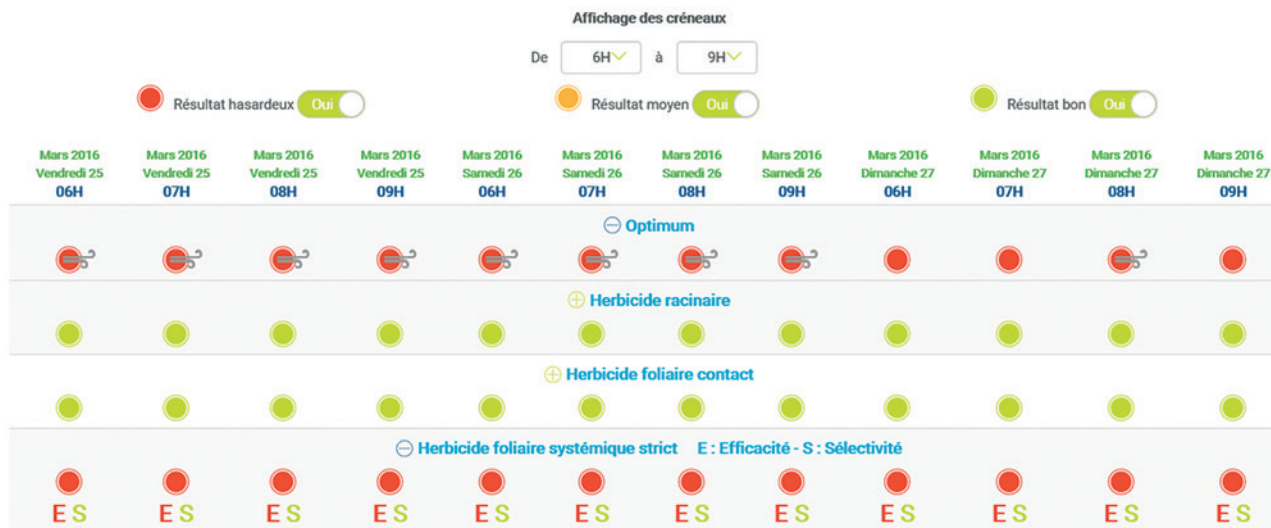


Figure 4 : Conseil extrait de l'application Taméo (Arvalis-Météo France). Conditions d'efficacité (E) et de sélectivité (S) de plusieurs types d'herbicide (racinaire, foliaire de contact ou foliaire systémique) en fonction des conditions climatiques (favorables, en vert / et défavorables, en rouge).

des périodes d'application peut s'avérer déterminant pour le résultat en termes de rendement et de qualité, dont l'impact économique est évident. Pour illustrer ce type de situation, prenons par exemple les conditions d'application d'un herbicide. Les paramètres climatiques au moment de la pulvérisation impactent fortement son efficacité. La Figure 4 ci-dessus montre comment il est possible d'indiquer à l'agriculteur le bon moment pour procéder à cette application. En l'occurrence, l'exemple illustré indique que le vent sera trop fort au cours des 3 jours à venir (vendredi, samedi et dimanche) pour envisager de procéder au traitement.

L'agriculteur travaille avec des éléments vivants, complexes, hétérogènes et en interaction forte avec le climat (dont les variations sont de plus en plus fortes sous l'influence notamment du changement climatique), sans tenir compte de la volatilité du contexte économique dans lequel évolue son activité. La prise de décision nécessaire pour gérer son exploitation est donc de plus en plus complexe. C'est pourquoi le monde agricole s'est doté d'outils d'aide à la décision (OAD) pour permettre aux agriculteurs de faire les bons choix, ou plutôt pour leur permettre de faire des choix qui soient cohérents avec leurs objectifs professionnels.

L'aide à la décision s'est fortement développée en grande culture dans plusieurs domaines :

- l'implantation des cultures, avec en particulier le choix des variétés, des dates et des densités de semis ;
- la fertilisation des cultures (estimation des besoins en engrais) ;
- la protection des cultures (modèles de prévision des maladies, lutte contre les ravageurs...) ;
- la gestion de l'eau ;
- les diagnostics environnementaux ;
- les performances économiques.

Le Tableau 1 ci-dessous rapporte les OAD majeurs diffusés par Arvalis et leur taux d'utilisation. Il fait apparaître que les surfaces concernées sont très significatives (70 000 ha, pour l'outil de prévision Mileos, ce qui représente 50 % des surfaces françaises cultivées en pommes de terre), et surtout, qu'elles sont en forte progression.

Farmstar Expert	Service d'aide à la conduite des cultures (gestion de l'azote, des risques de maladie et de verse) de blé et de colza à partir d'images satellitaires. Collaboration Arvalis - Airbus	793 000	+7 %
Septo-LIS®, Stadi-LIS® et Prévi-LIS®	Service de prévision des stades des céréales et des risques liés à l'apparition de maladies foliaires (septoriose sur blé)	2 170 000	+18 %
Miléos®	Service de prévision du risque mildiou sur la pomme de terre	70 000	+70 %
Irré-LIS®	Service d'aide à la gestion des irrigations en fonction du besoin des cultures (blé, orge, pomme de terre, maïs, tabac...) et du climat	21 000	+17 %
FertiWeb®	Service d'estimation de la fertilisation nécessaire des cultures (toutes cultures)	1 930 000	-
Taméo®	Service de gestion des risques en fonction de la météo prévisionnelle à la maille du km. Collaboration Arvalis-Météo-France	-	-

Tableau 1 : Surfaces d'utilisation (en hectares) des OAD majeurs de la gamme Arvalis et progression annuelle (en pourcentages).

De Farmstar aux digifermes

Le premier pas opérationnel vers l'agriculture de précision a été marqué par la proposition à grande échelle, dès 2002, d'un service utilisant les images satellite pour produire un conseil spatialisé à la parcelle à destination des agriculteurs afin de les aider à mieux gérer leurs cultures de blé et de colza. Quinze ans après son lancement, ce service couvre aujourd'hui près de 800 000 hectares en France. Il s'est enrichi au fil du temps de nouvelles applications et s'est ouvert à de nouvelles cultures : orge, triticale, maïs. Au-delà du réel intérêt qu'y trouvent les

agriculteurs (ce qui en soi est déjà un gage de leur intérêt pour l'agriculture de précision), l'innovation majeure de ce service réside dans le couplage de deux sphères cognitives *a priori* éloignées l'une de l'autre : le spatial et l'agronomie. Une véritable complémentarité a été créée entre l'imagerie satellitaire et les modèles agronomiques développés par les instituts techniques, pour aboutir à un conseil opérationnel à haute valeur ajoutée à l'attention des agriculteurs. En construisant ce nouveau type de service sont apparues également les questions fondamentales du numérique, lequel connaît aujourd'hui un nouvel élan.

C'est d'abord la question des **systèmes d'information** et de la gestion des grandes bases de données qui est posée. Traiter en l'espace de quelques heures les données issues d'images de la quasi-totalité de la France avec un pixel (surface élémentaire) représentant un carré de 10 à 20 mètres de côté, les combiner avec les données de 80 000 parcelles agricoles, lancer les calculs des modèles agroclimatiques s'appuyant eux-mêmes sur des bases de données agronomiques (variétés, sols, tables décisionnelles, etc.) et renvoyer des conseils aux agriculteurs dans un temps minimum... cela relevait, déjà à cette époque, du défi ! Les progrès du numérique, tant par la rapidité des calculs que par les modes de transmission des données, ont considérablement amélioré la performance du service, et aussi sa fiabilité.

Une autre question est rapidement apparue : celle qui concerne la **propriété des données**. À qui appartiennent les données ? Et d'abord, de quelles données parle-t-on ?

C'est une question de fond qui a conduit le service à proposer des règles de fonctionnement préservant l'anonymat des agriculteurs et leur garantissant la pleine propriété intellectuelle des données propres à leurs parcelles. Le système se nourrit également de la masse des données produites pour générer de nouveaux modèles et de nouveaux services. C'est là le début de la valorisation des données individuelles à des fins d'intérêt collectif. Notons que la propriété intellectuelle ne s'applique pas seulement entre les agriculteurs et les fournisseurs du service, mais qu'elle s'applique aussi entre les partenaires créateurs du service.

Le service *Farmstar* a posé également une autre question fondamentale : celle de l'**interopérabilité des systèmes d'information et des bases de données**. Le relais entre les fournisseurs du service et les agriculteurs est assuré par les coopératives, les négoce et les chambres d'agriculture. Or, ces entreprises et ces instances disposent de leur propre système d'information (il ne faut pas oublier que les agriculteurs eux-mêmes disposent de plusieurs types de logiciels de gestion parcellaire). La compatibilité des données nécessaire pour obtenir un *continuum* d'informations fluide et fiable est indispensable pour être à même d'assurer un service de qualité.

En 2017, les questions d'interopérabilité sont traitées *via* des systèmes API (*Application Programming Interface*) ; l'Internet est accessible avec un débit suffisant dans les campagnes ; les consoles dans les tracteurs s'adaptent

à plusieurs formats ; les connexions GPS ou RTK ont été fiabilisées ; et la connectique tracteur-outils est en voie de standardisation. Les applications numériques explosent aujourd'hui, y compris dans le domaine agricole, à un point tel que le concept de « ferme numérique » (ou « digi-ferme ») fait son apparition dans le domaine expérimental.

Deux digifermes créées par Arvalis, l'une en grande culture, l'autre en polyculture et élevage, proposent d'étudier les applications possibles du numérique au niveau d'une exploitation, d'évaluer leur intérêt sur divers plans et de coconstruire avec des *start-ups* de nouvelles applications. Une liste non exhaustive des tests en cours donne un aperçu des innovations numériques émergentes dans le domaine agricole :

- des robots de désherbage capables de remplacer ou de diminuer considérablement l'utilisation d'herbicides ;
- des systèmes de guidage automatique des tracteurs et des automoteurs ;
- des drones équipés de capteurs pour détecter la présence de mauvaises herbes dans les champs ;
- l'utilisation de puces RFID pour la gestion automatique des intrants ;
- toute une panoplie d'outils d'aide à la décision (fertilisation, irrigation, protection des cultures, conservation des grains...) ;
- des capteurs connectés installés dans les champs (mesure de la température, de la pluviométrie, de l'humidité du sol...) ;
- des pièges connectés pour alerter de la présence de ravageurs ;
- des capteurs installés dans les cellules de stockage de grains ou de tubercules ;
- les analyses rapides du sol et des matières premières ;
- des sondes de surveillance automatique des vèlages ;
- des systèmes de surveillance de l'activité des animaux ;
- la mesure électronique de la pousse de l'herbe pour adapter le calendrier fourrager ;
- le tableau de bord connecté de la ferme (robot de gestion globale et d'alerte sur les tâches quotidiennes)

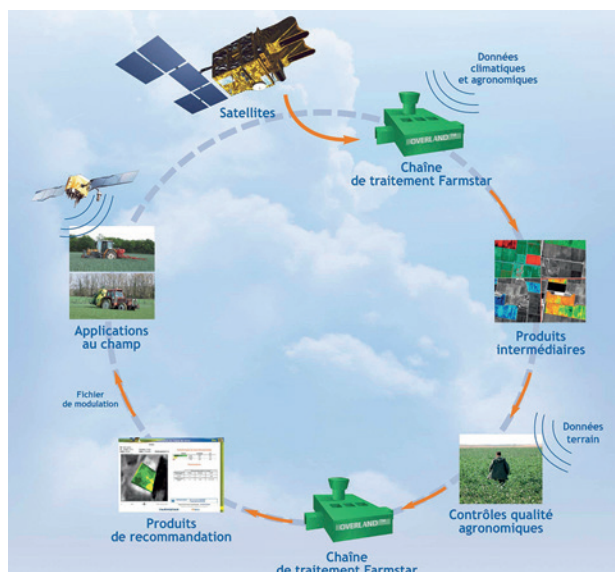


Figure 5 : Boucle technologique pour le traitement des données dans le cadre du service Farmstar.



Figure 6 : Les axes de recherche & développement au sein des Digifermes® Arvalis.

Un des objectifs (et pas des moindres) des digifermes est aussi d'évaluer l'intérêt économique de toutes ces applications. Une exploitation agricole est d'abord une entreprise économique qui doit, pour assurer sa survie, rechercher en permanence des gains de compétitivité. Ce dispositif expérimental permettra de trier les innovations entre ce qui relève du monde de l'utile et ce qui relève de celui des gadgets.

Pourquoi numérique et agriculture de précision font-ils bon ménage ?

La révolution du numérique dans le domaine agricole se nourrit de deux sortes d'innovation :

- l'explosion des capteurs miniaturisés à faible coût,
- et l'exploitation des grandes bases de données.

Les progrès technologiques en matière de conception et de construction des capteurs contribuent non seulement à leur diversification, mais également à réduire considérablement leur coût de production. À titre d'exemple, des capteurs à réflectance infrarouge de la taille d'une boîte d'allumettes peuvent prétendre analyser des constituants du végétal avec une précision suffisante pour permettre à un agriculteur de prendre des décisions en toute connaissance de cause sans avoir à faire pratiquer une analyse coûteuse (souvent par un laboratoire) dont le résultat sera connu, dans le meilleur des cas, dans les jours suivants. Il est évident que ce type d'innovation (si les tests le confirment) peut révolutionner les pratiques agricoles au quotidien. Le lien avec l'agriculture de précision est direct, car, souvent, la mise en œuvre d'une technique plus « précise » nécessite un diagnostic objectif de la situation et un retour d'information rapide. Les capteurs couplés à des logiciels d'interprétation peuvent apporter ce service pour un faible coût. La multiplication des mesures n'est plus un facteur limitant et offre, de surcroît, la possibilité de cartographier et de spatialiser les caractéristiques du sol, les besoins des cultures, d'individualiser l'alimentation des animaux, etc. Dans la chaîne technologique de l'agriculture de précision, le maillon « diagnostic spatialisé à faible coût » restait le maillon faible. Levé partiellement, ce verrou est en passe de l'être totalement.

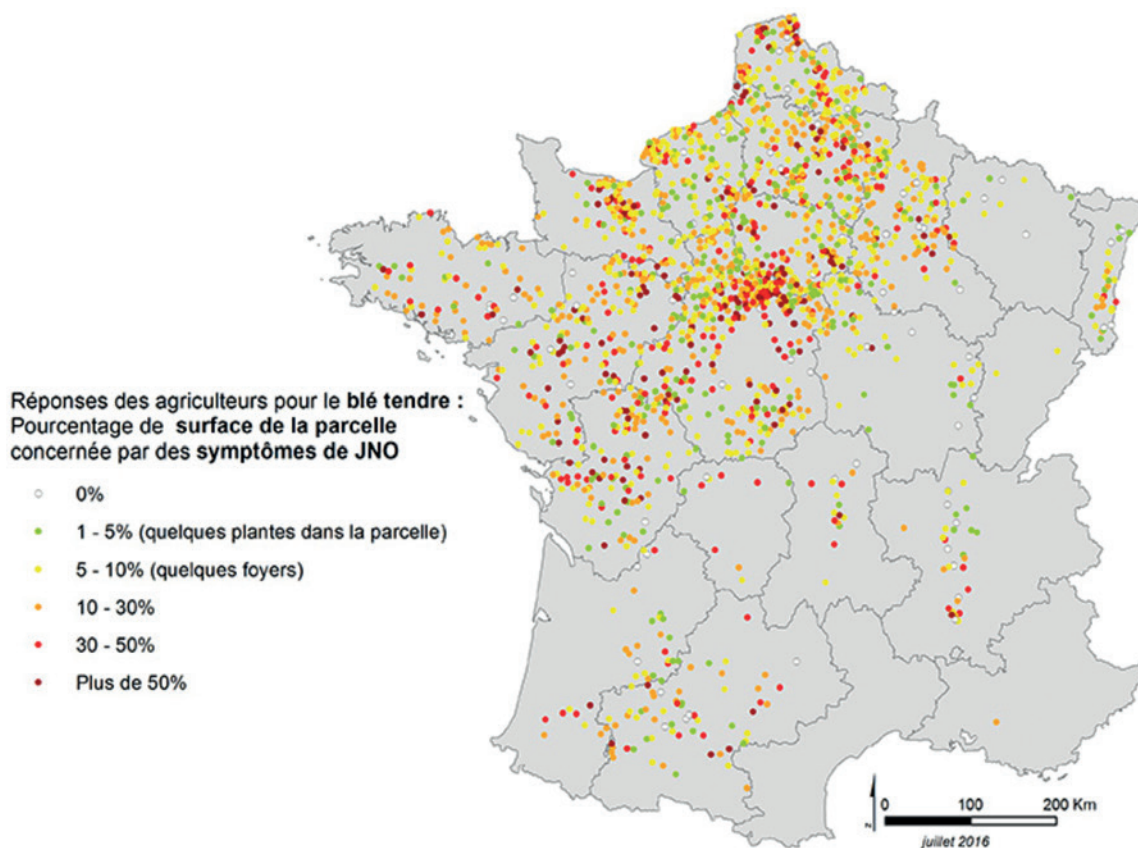
L'autre pilier de la révolution numérique en agriculture repose sur l'exploitation des grandes bases de données. L'exemple le plus illustratif que nous pouvons en donner est celui des modèles prévisionnels de maladies. Ces outils prévisionnels du risque sanitaire sont très utiles aux producteurs pour déclencher à bon escient un traitement ou, au contraire, le suspendre s'il n'est pas absolument nécessaire. Dans les deux cas, la pratique est gagnante. Pour cela, il faut disposer de modèles agroclimatiques performants par type de bio-agresseur (ce sont des modèles qui utilisent des données climatiques et les connaissances sur le parasite en cause).

La rouille jaune, par exemple, est une des maladies les plus préjudiciables pour les céréales. En cas d'absence de traitement ou de traitement inadapté, la perte peut atteindre 50 % de la récolte. Comme cette maladie a un développement explosif, il est important de prévoir sa survenue afin de positionner le traitement dans les conditions optimales d'efficacité. Malheureusement, ce champignon a tendance à muter dans le temps, ce qui peut rendre rapidement obsolète un modèle prévisionnel qui avait fait ses preuves jusque-là. Cela fut le cas, il y a de cela quelques années. La remise à niveau d'un modèle peut prendre des années d'expérimentations au champ pour retrouver un niveau de performance satisfaisant. Le choix qui a été fait a été tout autre : nous avons exploité les centaines de milliers d'observations faites par les techniciens et conseillers grâce au réseau national de biosurveillance du territoire et nous avons pu remettre à jour le modèle, en une seule campagne et sans que nous ayons eu besoin de faire un seul essai.

Pour illustrer le bénéfice que l'on peut tirer des bases de données issues de l'observation au champ, nous pouvons citer l'incroyable mobilisation des agriculteurs au cours de l'hiver 2015-2016, qui ont remonté en deux semaines plus de 2 000 observations de terrain, qui ont permis de cartographier les dégâts causés par le virus de la JNO (jaunisse nanisante de l'orge), lequel est lui-même apporté par les pucerons et inoculé aux cultures lors des périodes automnale et hivernale.



Figure 7 : Symptômes de rouille jaune sur du blé tendre d'hiver (en l'absence de tout traitement, la perte peut atteindre 50 % de la récolte).



© ARVALIS

Figure 8 : Les 2 036 remontées d'informations par les agriculteurs sur le niveau d'infestation des parcelles de blé par le virus de la jaunisse nanisante de l'orge (JNO).

La valeur ajoutée est dans le traitement des données

Si le monde agricole connaît en ce moment une véritable explosion des innovations, en particulier du côté des capteurs, il n'en reste pas moins vrai que la valeur ajoutée se situe dans l'interprétation du signal. Il en va d'ailleurs souvent ainsi. Par exemple, l'imagerie satellitaire était capable, dès le milieu des années 1970, de livrer des informations d'une précision étonnante sur la couverture végétale, mais tant que cette information n'était pas traduite en indicateurs utiles pour les producteurs, nul ne pouvait s'en saisir. Les modèles agroclimatiques n'existaient pas encore à cette époque. Il a fallu attendre le début des années 2000 pour pouvoir opérer un premier couplage et donner du sens à l'information. Nous sommes aujourd'hui confrontés au même problème : la technologie des capteurs évolue plus rapidement que la science du traitement des données, ce qui met parfois en panne une technologie apparemment innovante, mais en manque de décodage.

Si l'on prend l'exemple des capteurs embarqués sur des drones, l'on s'aperçoit que ce mode d'acquisition de données est capable de délivrer une information très détaillée de la parcelle agricole, à l'échelle centimétrique. Cette ultra-précision n'est pas exploitable à ce jour, car la maille décisionnelle est calée aujourd'hui en fonction des lar-

geurs de travail des matériels agricoles (allant le plus souvent de quelques mètres à quelques dizaines de mètres).

Toujours à propos des drones, un autre exemple concerne la cartographie des adventices dans une parcelle. Les capteurs embarqués sont capables d'enregistrer la réflectance du couvert végétal, mais l'interprétation du signal ne permet pas aujourd'hui de différencier les adventices



Figure 9 : Exemple de plantes adventices localisées entre deux rangs de maïs. Cette configuration est détectable avec des drones équipés de capteurs (mais la différenciation du type d'adventice reste difficile).

des variétés cultivées, sauf dans le cas de cultures en lignes, comme le maïs, le tournesol, la betterave... L'identification du type d'adventice (utile pour déterminer le type de désherbage à opérer) n'est, à ce jour, pas encore opérationnelle.

D'une façon générale, le verrou technologique n'est pas aujourd'hui lié à la performance des capteurs, qui, par ailleurs, vont continuer à s'améliorer. Il est dans le traitement de l'information à haut débit pour, d'une part, lui donner du sens sur le plan décisionnel et, d'autre part, permettre un retour rapide sous la forme de conseils aux producteurs. En effet, en agriculture, le temps de retour est lui aussi un élément déterminant, car les cultures, le climat et les parasites sont en permanente évolution. Si le délai entre le diagnostic et l'intervention, de quelle que nature que ce soit, est trop important, l'information perd la majeure partie de son intérêt, en particulier dans le domaine de la protection des cultures, là où le délai raisonnable se situe entre un jour et une semaine au grand maximum.

Conclusions

On peut retenir de cette réflexion sur le numérique et l'agriculture de précision plusieurs constats et quelques pistes d'évolution.

L'idée la plus importante est que l'agriculture et les agriculteurs sont, pour la plupart, très ouverts aux progrès du numérique, car c'est pour eux un levier supplémentaire pour mieux gérer le contexte très incertain (aléas climatiques et économiques) dans lequel s'exerce leur métier.

L'entreprise agricole est, en outre, un lieu de complexité dans lequel se prennent tous les jours des décisions importantes dans des domaines très différents : économie, agronomie, conduite des animaux, fiscalité, sécurité... Les possibilités offertes par le numérique renforcent les services d'aide à la décision dont les agriculteurs ont besoin, grâce à des outils simples à utiliser et réactifs.

La recherche de précision dans les pratiques culturales est une voie déjà bien connue des agriculteurs, car elle est porteuse de bénéfices sur les plans économique et environnemental. Les applications issues du numérique la renforcent, ouvrant notamment de nouvelles perspectives en matière de modulation intraparcellaire des intrants.

L'aspect social (même si nous l'avons peu développé) bénéficie également des apports du numérique. L'adoption du guidage automatique des engins agricoles, les robots de traite des vaches déjà plébiscités par les éleveurs, les robots de travail dans les champs (encore en test) sont autant d'innovations qui vont vers un allègement de la charge de travail des agriculteurs, un aspect auquel ils ne sont pas insensibles.

Les nouvelles technologies au sens large sont aussi un facteur d'attractivité pour les jeunes qui s'intéressent à l'agriculture et renvoient à la société une image de modernité du monde agricole, ce qui n'est pas sans lui déplaire.

Quelques points focalisant l'attention interpellent cependant le monde agricole, notamment deux d'entre eux. Le premier concerne la question des données et de leur utilisation. La propriété des données produites par les agriculteurs reste un sujet sensible, tout comme l'est leur crainte permanente des contrôles, que viendrait renforcer la mise en connexion de bases de données contenant des informations personnelles sur les agriculteurs. Le second concerne davantage la sphère du conseil technique qui, aujourd'hui, se limite quasi exclusivement à des organismes de développement (chambres d'agriculture, coopératives, négoce), des organismes qui, demain, pourraient être concurrencés par des *start-ups* capables de fournir du conseil grâce au simple traitement de grandes bases de données alimentées par une profusion de capteurs.

Le point de vue d'une ONG environnementale

Par Morgane CRÉACH

Directrice du Réseau Action Climat France (RAC-F)

Les liens entre transition numérique et transition écologique, au-delà d'illustrations positives, sont loin d'être naturels. Non seulement la transition numérique a un impact important sur l'environnement, mais, en outre, les usages et les nouvelles manières de faire qu'elle engendre sont loin d'être tous orientés vers une plus grande protection de la planète. Cela tient à une raison simple : ce n'est pas là sa vocation première.

Pour autant, doit-on continuer de penser ces deux transitions parallèlement ?

La révolution de nos modes de production et de consommation d'énergie et de nos modes de déplacement pourra-t-elle passer outre le soutien de certaines innovations, si l'on souhaite qu'elle s'accomplisse à un niveau et à un rythme suffisants pour nous mettre à l'abri d'un dérèglement climatique irréversible ?

Loin de représenter l'unique instrument sur lequel la transformation écologique de nos sociétés doit se fonder, la transition numérique a cependant, sous certaines conditions, un rôle à jouer.

Sous nos yeux se déploient deux transitions, la transition numérique et la transition écologique, mais à des rythmes différents.

La transition numérique évolue à une cadence effrénée et fait partie intégrante des nouveaux modèles industriels et économiques qui voient le jour. La transition écologique, bien qu'amorcée, évolue, quant à elle, à un rythme bien trop lent par rapport à ce que requiert la protection de la planète, notamment pour éviter un réchauffement global supérieur à 1,5 °C d'ici à la fin du siècle.

Nous avons donc, d'un côté, une transition numérique déjà bien engagée, et exponentielle, mais qui ne vise pas *a priori* un objectif déterminé, et, de l'autre, une transition écologique avec un objectif clair, bien identifié, mais qui peine à revêtir la dimension requise pour pouvoir atteindre son but. Devant la coexistence de ces deux transitions, certains considèrent qu'un levier de mutualisation existe, celui visant à mettre la transition numérique au service de la transition écologique.

Certes, des exemples de développement du numérique témoignent du rôle d'accélérateur que celui-ci peut jouer en matière de transition écologique : création de plateformes Internet de *crowdfunding* pour financer des projets d'énergies renouvelables, développement du covoiturage *via* des applications dédiées, etc.

Ces illustrations, bien que positives, ne doivent toutefois pas occulter une réalité, celle de l'impact négatif non négligeable de la révolution numérique sur l'environnement.

Pour ne prendre qu'un exemple, entre cinquante et soixante métaux rares non renouvelables sont utilisés pour fabriquer nos *smartphones*, ce qui requiert la mise en place d'une véritable surexploitation minière aux impacts dévastateurs sur l'environnement.

Dès lors, pour que la transition numérique puisse à terme jouer un rôle positif important dans la transition écologique, il faudrait, d'une part, qu'elle réduise sa propre empreinte écologique et, d'autre part, qu'un but lui soit clairement assigné, celui de sa mise au service du développement de pratiques respectueuses de l'environnement.

Une transition numérique ayant une empreinte environnementale importante

Épuisement des ressources naturelles, consommation d'énergie, effet de serre additionnel, destruction de la couche d'ozone, eutrophisation de l'eau, fabrication de déchets, ce sont là autant d'impacts environnementaux négatifs produits par nos téléphones portables, essentiellement issus de la phase de fabrication telle que l'a analysée l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe). Les technologies de l'information et de la communication (TIC), même si elles rendent certains services et si elles offrent des usages immatériels, n'en débouchent pas moins sur une réalité tangible : la fabrication, l'usage et la fin de vie des différents appareils que nous utilisons exercent une pression insoutenable sur notre planète. Le géant Internet n'est pas en reste :

Photo © Source/ZUYMA-REA



Enfant travaillant à l'extraction du coltan au Nord Kivu (République démocratique du Congo), 28 juin 2011.

« Les conséquences sociales du développement du numérique ne doivent pas non plus être passées sous silence, l'exploitation des métaux rares s'opérant bien souvent dans des conditions inhumaines. »

à l'échelle mondiale, stocker les données, les protéger et les partager, au sein de centres de données, cela conduit à une consommation importante d'électricité, majoritairement satisfaite par des énergies fossiles. Le secteur de l'informatique représente 7 % de la consommation mondiale d'électricité et son impact sur le climat équivaut à celui de l'aviation. Greenpeace, dans un rapport de 2012 intitulé « Votre *Cloud* est-il net ? », a étudié les services de *cloud computing* proposés par des acteurs majeurs d'Internet tels qu'Amazon, Apple ou Microsoft. Très forte, la demande en électricité générée par ces services est principalement satisfaite à partir de sources d'énergie polluantes, comme le charbon (Apple ferait ainsi appel à 55,1 % d'électricité produite par des centrales thermiques au charbon pour alimenter ses *data centers*, et HP à 49 %).

Au-delà des sources d'énergie polluantes utilisées pour alimenter l'ensemble du système informatique au niveau mondial, l'usage que chacun fait des nouvelles technologies de l'information doit être pris en compte pour mesurer l'impact de celles-ci sur notre environnement. Par exemple, les courriels permettent *a priori* de réduire notre consommation de papier et l'énergie nécessaire au transport du courrier. Mais la multiplication du courrier électronique a un impact important sur le climat. Dans une entre-

prise française de 100 personnes, chaque collaborateur reçoit environ 58 courriels par jour et en envoie 33. L'envoi de ces 33 courriels par jour, avec une pièce jointe d'1 mégaoctet, à deux destinataires, génère, par personne, 180 kilogrammes de CO₂/an, ce qui équivaut aux rejets causés par plus de 1 000 kilomètres parcourus en voiture⁽¹⁾. Autre exemple : on change en moyenne de téléphone portable tous les dix-huit mois et de PC tous les trois ans. Or, la réduction de cette durée d'utilisation est très néfaste pour l'environnement.

Dans un contexte où l'usage des nouvelles technologies est amené à augmenter, si aucune attention n'est portée à l'impact du numérique sur notre environnement, le maintien d'un réchauffement de la planète au-dessous de 1,5 °C sera tout simplement un objectif hors de portée. Les conséquences sociales du développement du numérique ne doivent pas non plus être passées sous silence, l'exploitation des métaux rares s'opérant bien souvent dans des conditions inhumaines (en témoigne l'extraction du coltan en République démocratique du Congo). D'un point de vue social et écologique, la

(1) <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-internet-courriels-reduire-impacts.pdf>

révolution numérique a donc encore beaucoup de chemin à parcourir avant de pouvoir être considérée comme vertueuse.

Au-delà de ce constat, la transition numérique peut-elle en parallèle induire des effets bénéfiques sur l'environnement ? Dans le sens où elle ouvre de nouvelles voies pour changer les comportements, collectifs et individuels, elle fait parfois office de vecteur de la transition écologique. Ainsi, par exemple :

- les plateformes de *crowdfunding* permettent à des citoyens de placer leur épargne dans des projets bénéfiques pour le climat, comme c'est le cas avec l'initiative d'Énergie partagée qui œuvre au financement de projets renouvelables locaux et qui a déjà réussi à réunir près de 5 000 actionnaires citoyens, à collecter 12 millions d'euros et à financer 32 projets locaux ;
- en favorisant la réutilisation d'objets, les sites de troc ou d'achats d'occasion permettent d'acheter moins souvent du neuf, et donc d'éviter la fabrication de nombreux biens ;
- pour lutter contre la congestion du trafic routier aux impacts négatifs importants sur la pollution de l'air, le climat et la santé, la Métropole de Lyon a mis en place un entrepôt de données qui permet à n'importe quel habitant de savoir en temps réel, à partir de son téléphone mobile, comment optimiser son trajet. Pour le fret, un outil en ligne d'optimisation des tournées a été mis en place afin d'en améliorer la gestion. *Via* ce projet, Optimod'Lyon, c'est plus de 30 000 tonnes de CO₂ qui sont évitées chaque année.

L'association des transitions numérique et écologique trouve ainsi des illustrations concrètes dans nos vies quotidiennes. Cependant, pour permettre d'appréhender dans quelle mesure la transition numérique apporte (ou est susceptible d'apporter) un gain net pour l'environnement, il convient d'appréhender de manière plus fine certains aspects, tels que :

- les contre-exemples d'innovations numériques qui jouent en défaveur de la protection de notre environnement ;
- les gains en trompe-l'œil de certaines innovations à visée environnementale.

Si le numérique ouvre la voie à des changements de comportement, ces derniers peuvent se faire aussi bien dans un sens que dans l'autre, en matière de préservation de la planète. Ainsi, aux côtés des sites de covoiturage, qui se développent, les sites permettant de trouver la meilleure offre pour partir à la dernière minute en avion se multiplient eux-aussi. La raison tient au fait que la révolution numérique n'a jamais eu dans son ADN l'objectif de la préservation de l'environnement.

Par ailleurs, contrairement à une idée reçue, dématérialiser nos activités ne signifie pas nécessairement avoir un impact moindre sur l'environnement. La réalité est plus complexe et les modes de consommation collaboratifs peuvent agir en trompe-l'œil. Ainsi, l'Ademe, en analysant treize pratiques de consommation collaborative, a montré que cela ne signifie pas automatiquement consommer responsable et que le gain environnemental dépend forte-

ment de la pratique conventionnelle à laquelle la pratique collaborative vient se substituer⁽²⁾.

Ainsi, par exemple, en ce qui concerne le covoiturage longue distance, même si le taux d'occupation moyen est élevé (3,5 passagers/véhicule), il faut prendre en compte la pratique à laquelle ce covoiturage se substitue : 12 % des personnes n'auraient pas voyagé en l'absence d'une offre de covoiturage et 63 % des covoituteurs auraient pris le train. La réduction de l'impact environnemental n'est que de 12 % si l'on prend en compte la réalité de cette substitution (effet rebond inclus). De la même manière, la forte adhésion aux applications mobiles de VTC comme Uber n'est pas dénuée d'effets pervers : une étude menée dans la ville de New York a montré que l'essor de ces véhicules avait accentué la congestion dans le centre de la ville et dépassé la hausse de l'utilisation des transports en commun en raison de leur faible coût économique⁽³⁾.

Tout dépend donc de l'usage qui est fait des nouvelles pratiques, des nouvelles manières de faire et des nouveaux services offerts par la transition numérique.

Et comme en matière d'innovations numériques, les usagers des modes de consommation collaboratifs n'ont pas pour ambition première d'avoir un effet positif sur l'environnement : une intervention extérieure doit donc se manifester pour pouvoir connecter la transition numérique à la transition écologique.

De la nécessité de « connecter » le numérique à la transition écologique

La vocation environnementale de la transition numérique n'étant pas innée, une intervention volontariste, extérieure, est nécessaire pour réduire l'importante empreinte environnementale négative de son développement et pour orienter les nouvelles technologies dans le sens de la préservation de l'environnement.

Cette intervention extérieure peut venir de la pression exercée par les ONG et par les citoyens pour que les entreprises réduisent leurs impacts négatifs sur l'environnement. Ainsi, par exemple, dès 2009, Greenpeace a procédé au classement des entreprises du secteur informatique selon leurs performances énergétiques. Elle a demandé aux plus grandes entreprises du *Net* de s'engager pour un approvisionnement basé à 100 % sur des énergies renouvelables. Facebook, Apple et Google sont les premiers à s'être engagés : Apple est aujourd'hui en tête, avec 83 % d'énergies renouvelables dans sa consommation.

Cette intervention extérieure peut également venir des pouvoirs publics, qui, par l'élaboration de réglementations et par l'apport d'aides spécifiques, peuvent soutenir des entreprises qui innent dans le sens de la préservation de l'environnement. Par exemple, le gouvernement français a lancé des incubateurs de la *GreenTech* verte, qui sont des

(2) <http://www.ademe.fr/potentiels-dexpansion-consommation-collaborative-reduire-impacts-environnementaux>

(3) Shaller, février 2017, <http://schallerconsult.com/rideservices/un-sustainable.htm>

creusets d'innovation se situant à la confluence des technologies numériques et de la transition écologique et qui ont pour vocation d'accompagner le développement de *start-ups* de la *GreenTech* verte, en mettant en synergie tous les acteurs de l'écosystème, des acteurs aujourd'hui relativement dispersés.

Lutter contre le changement climatique requiert un effort considérable dans l'ensemble des secteurs d'activité économique. Que ce soit dans les secteurs des transports, de l'habitat, de l'agriculture ou de l'énergie, les nouvelles technologies devront jouer un rôle important dans ces réformes nécessaires.

Ainsi, dans le secteur des transports (le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre en France), le numérique devra servir de vecteur de connaissances sur les mobilités et de levier à des changements de comportement. On compte, en France⁽⁴⁾, environ 175 millions de déplacements par jour ouvré. La connaissance des flux et des pratiques sera indispensable pour répondre aux besoins, tout en restant dans le cadre de la transition écologique. En cela, le partage des données de mobilité pourra être mis à profit dans les prises de décisions relatives à l'aménagement du territoire. *In fine*, ce type d'application se fera au profit des individus qui bénéficieront de l'amélioration de l'offre et des services de transport.

Autre exemple, lors de la COP21, 700 villes à travers le monde se sont engagées à être « 100 % énergies renouvelables » d'ici à 2050. Le numérique est l'un des éléments indispensables pour faciliter la réduction de la consommation d'énergie dans les transports, le bâtiment et l'éclairage urbain et pour gérer l'équilibre entre la demande et la production d'énergie. Ainsi, au niveau d'un quartier ou d'une ZAC, les fonctions « *smart grid* » permettront d'accroître localement la flexibilité des systèmes électriques grâce à une meilleure adéquation entre l'offre locale disponible et les besoins en temps réel, favorisant ainsi une intégration optimisée des énergies renouvelables. Associées à des actions d'amélioration de l'efficacité énergétique, ces fonctions permettront de limiter les investissements dans de nouvelles infrastructures

de réseaux. En apportant une valeur ajoutée aux usagers dans le cadre d'un projet global, non seulement la transition numérique aura de meilleures chances de trouver son modèle économique, mais elle sera aussi une brique d'un projet d'ensemble.

C'est ce type d'innovation que les pouvoirs publics (gouvernement et collectivités locales) doivent encourager.

Conclusion

Il existe donc une ambivalence dans les liens entre transition numérique et transition écologique. D'un côté, la nécessaire transition écologique aura besoin d'être soutenue par des innovations technologiques. De l'autre, la transition numérique a, de manière générale et jusqu'à présent, toujours eu un impact néfaste sur la protection de l'environnement, de par les modèles de production sur lesquels elle s'appuie et de par certains usages qu'elle engendre. Il conviendra donc d'agir sur les leviers suivants pour garantir, à l'avenir, un rôle positif de la transition numérique : il va notamment falloir que les acteurs du secteur revoient en profondeur leurs modèles de production et de consommation ; que la transition numérique soit orientée et soutenue (notamment par les pouvoirs publics), si l'on veut vraiment qu'elle vise un objectif de protection de l'environnement.

Cependant, et même à ces conditions, la transition numérique ne représente pas une baguette magique qui nous permettrait de mener à bien la nécessaire transformation écologique. Comme tout outil mis entre nos mains, ses bénéfices dépendront largement de l'usage que l'on en fera et, là encore, d'autres types d'instruments doivent être mis en place (fiscalité, réglementation, etc.) pour faire en sorte que chacun de nos usages et que chaque produit que nous utilisons respectent l'impératif environnemental auquel nous sommes confrontés.

(4) INSEE : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1281086>

Accelerating Energy & Environmental Transition in Europe through digital

By Julia REINAUD

Director I24C

Nicolas CLINCKX

Vice-President Energy & Utilities

and Paul FARAGGI

Manager Energy & Utilities Capgemini Consulting ⁽¹⁾

Digitalization is becoming ubiquitous in the energy sector, enabling a more decentralized energy system and blurring the traditional energy sector boundaries, with more integration with buildings, mobility solutions and industry. Digitalization is accelerating the pace of the energy transition, mainly thanks to three levers: 1) enhancing customer interaction with the energy system, 2) optimizing operations, and 3) enabling new business models for traditional energy actors as well as opening up space for new entrants from other sectors and energy startups. Digital technologies are also facilitating a cost-effective, clean energy transition, mainly by increasing energy efficiency and flexibility, as well as enabling the integration of renewable electricity into smart(er) grids and developing low-carbon solutions.

This article gives a brief overview of the digitally-enabled innovations in Europe's energy markets and how various players are positioning themselves to take advantage of these opportunities. It concludes by highlighting some of the policy issues this transformation raises and the challenges ahead for European businesses to reap the benefits.

Energy transition: a fast growing market, enabled by digitalization

The energy transition, which combines the development of renewable energy, energy efficiency, and other low-carbon technologies and services, is likely to be a fast growing market with double-digit annual growth in the next decade. Digitalization ⁽²⁾, which is part of the fifth technological revolution ⁽³⁾ and driven by a combination of technologies such as Internet of Things, Machine-to-Machine technology, advanced analytics, cloud platforms, social networks, mobile apps, or Integrated Energy Management Solutions, will accelerate the energy transition even further.

But not all European countries, market segments or technologies are equally attractive. According to the latest reports from the IEA, Navigant or Technavio and Capgemini Consulting's own studies, the fastest growing energy efficiency markets in Europe will be France, Germany, Italy and the UK, growing by more than 15% a year, while analysts forecast slower growth in Southern Europe. Offices and commercial buildings like hotels, restaurants, and hospitals offer greater opportunities than industrial ⁽⁴⁾ or residential segments according to these studies.

The digital revolution is enabling the development of smart ⁽⁵⁾ energy solutions and creating new markets from which European companies can profit. Utilities, energy equipment providers, service providers from different sectors, start-ups and end-users, are all expecting to generate additional value from these new services and cost savings. They also anticipate benefits from lower greenhouse (GHG) emissions.

(1) The authors would like to thank the following people for reviewing or providing statements to this article: Claire Tutenuit (Entreprises pour l'Environnement), Emmanuel Lagarrigue (Schneider Electric), Virginie Pelletier (BNP-Paribas), Jérôme Schmitt (Total GRP), Laurent Schmitt (ENTSO-E), Yves Michel (Primagaz), Pierre Sekrine (InnoEnergy KIC), Edward Robinson (ECF) and Richard Lavergne (CGEJET).

(2) The adoption or increase in use of digital or computer technology by an organization, industry, country, etc. (source: Oxford English Dictionary).

(3) *The Age of Information and Telecommunications: See C. Perez, Technological Revolutions and Financial Capital: the Dynamics of Bubbles and Golden Ages.*

(4) The industrial sector is considered more mature, having significantly invested in energy efficiency solutions such as automation or smart metering over the past decade.

(5) "Smart" is generally used to refer to an application of digitalisation in the energy sphere (such as smart metering, smart grid, smart home...).

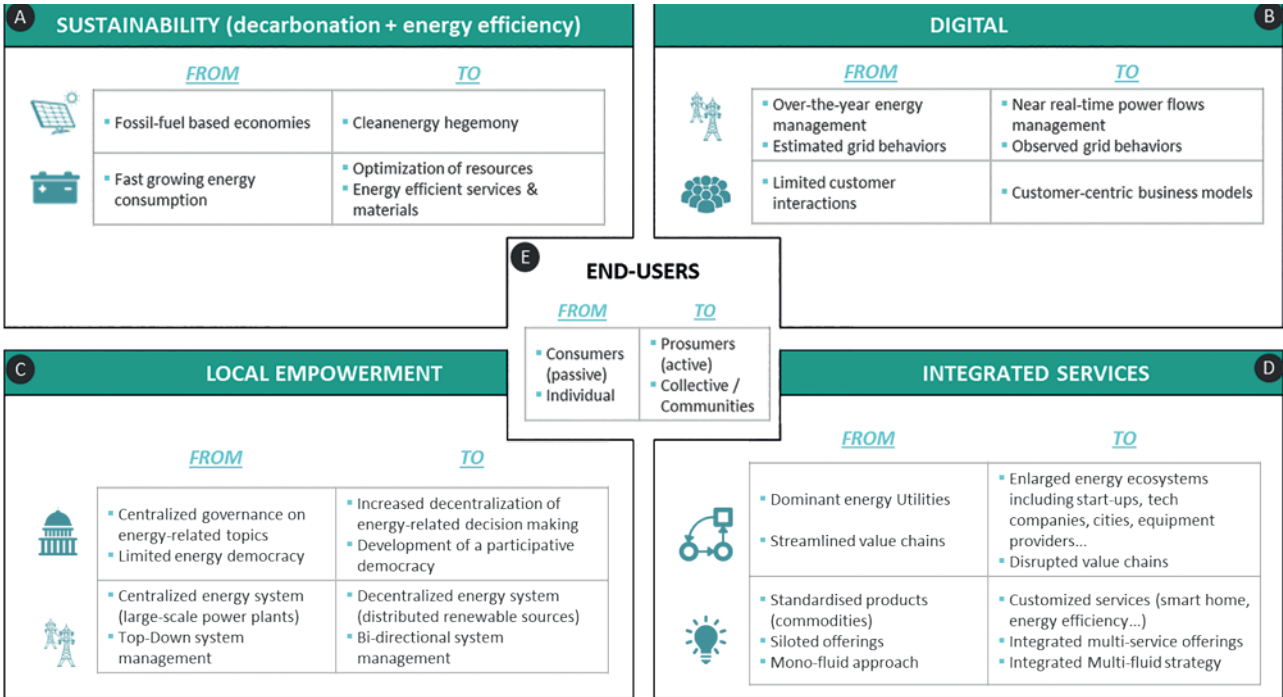


Figure 1: Four megatrends driving the energy transition. Source: i24c & Capgemini Consulting.

The total value of digitalization for the power sector alone is estimated by the World Economic Forum to be around \$1.3 trillion globally between 2016 and 2025⁽⁶⁾.

Digitalization is part of four rapidly emerging, interrelated, megatrends that are profoundly changing the European energy system, along with sustainability, local empowerment, and integrated services (see figure 1).

We observe in most parts of Europe, a paradigm shift towards low-carbon and user-centric economies, driven by digital and integrated flexible solutions putting end-users in the driving seat. New actors, such as electricity aggregators and car-sharing platforms, are putting end-users at the center of decision-making. Even incumbent energy companies are moving from selling electricity or energy equipment to offering services that satisfy customer needs. The “prosumer”⁽⁷⁾ is now an established feature of the energy system and growing in importance: for instance, private citizens and farmers now own almost half of Germany’s renewable energy installed capacity, while in Denmark, private individuals own 85% of its wind turbines. Similarly, crowdfunding and crowdlending⁽⁸⁾ are enabling citizens to finance the deployment of renewable projects and energy efficiency measures⁽⁹⁾.

If Digital is a key lever of the Energy revolution, it could also be a significant risk: digitalization is a major factor of electricity consumption growth. Digitalization will reduce emissions if this electricity is low-carbon. In addition, rebound effects and the footprint of the required equipment should be harnessed”.

Claire Tutenuit, déléguée générale, Entreprises pour l’Environnement

Digitalization is accelerating the pace of the Energy and Environmental revolution, addressing all core aspects of businesses: customer experience, operations and business models

Digital technologies are contributing to the environmental transition across the energy sector (from energy production to transportation, distribution, consumption and associated services). For instance, they are leading to higher efficiency in operations up and down the energy supply value chain, thanks to better analytics, the use of virtual environments⁽¹⁰⁾, the introduction of automation and artificial intelligence. Digitalization is also enabling the integration of renewable energies into smart(er) grids. The various components of the energy system communicate more and more with each other - from electricity generation to transport and storage, and from distribution to consumption. The conversion of electricity meters into smart meters means we can track, in real time, how much electricity has been consumed when and where. All this is bringing about a fundamental shift: supply is geared to demand,

(6) [http://reports.weforum.org/digital-transformation/electricity-generating-value-through-digital-transformation/Significant areas of value are identified as: Asset life cycle management, Grid optimization and aggregation, Real-time supply and demand platforms, Integrated customer services, Beyond the electron.](http://reports.weforum.org/digital-transformation/electricity-generating-value-through-digital-transformation/Significant%20areas%20of%20value%20are%20identified%20as:%20Asset%20life%20cycle%20management,%20Grid%20optimization%20and%20aggregation,%20Real-time%20supply%20and%20demand%20platforms,%20Integrated%20customer%20services,%20Beyond%20the%20electron.)

(7) Contraction of “producer” and “consumer”.

(8) In April 2016, Générale du Soleil (French PV developer) raised more than 1 M€ over 5 days using the crowdlending platform Lendosphere.

(9) See also PELLERIN-CARLIN T. and SERKINE P. (2016), Europe needs crowd-based innovation for a competitive energy transition, Institute Jacques Delors.

(10) Such as remote digital technical centers or cockpits, see below.



Photo © Daniel Pilar/LAIF-REA

Family farm in Schleswig-Holstein with wind turbine and solar panels.

“Private citizens and farmers now own almost half of Germany’s renewable energy installed capacity, while in Denmark, private individuals own 85% of its wind turbines.”

but demand also adapts to supply, which facilitates the integration of more non-dispatchable⁽¹¹⁾ renewable power sources (such as wind or photovoltaics).

Beyond these benefits, digitalization is driving the deployment of new technologies and the creation of new models (digital services platforms, market places, digital communities, connected energy equipment and related services) that could be game-changing as they empower end-users, industry, local communities or regions and make them a more integral and active actor in the energy system. Figure 2 (please see below) illustrates the range of opportunities that digital levers provide to the energy system.

Digital boosts the customer-side of the energy transition

Traditionally for citizens, energy is a pure commodity, the management of which they do not prioritize because there is no buying or consuming experience. Smart meters and smart homes may help to fill this gap because they make energy visible. Furthermore, digital technologies are people-centric and they progressively enable human beings in their social environment to express their identity via energy. For instance, with residential solar PV comes a social status, which drives adoption in adjacent neighborhoods⁽¹²⁾.

Digital has historically been used in the energy industry to improve customer experience, and more specifically to

facilitate energy savings through smarter energy efficiency programs, demand-side response, and cross-sector coupling. First, digital vastly increases service providers’ ability to interact with customers, using social media, website, smartphone, call, email, etc. For example, eprimo, a subsidiary of the German utility Innogy, does 70% of its business online⁽¹³⁾. It reduces costs for utilities (cost to acquire and cost to serve⁽¹⁴⁾), while making the customer more active in his energy consumption. Furthermore, digital enables smart home solutions (such as Greenely⁽¹⁵⁾, in Sweden, or Centrica’s Hive Active Heating in the UK), which enable customers to better monitor and control their consumption, while increasing positive customer contacts with the utility. Digital also offers quick and simple tools for a residential consumer to evaluate their home’s solar power potential (ex: Google Sunroof).

(11) i.e. that cannot be turned on or off to meet the economies’ fluctuating electricity needs.

(12) See also PELLERIN-CARLIN T. and SERKINE P., From distraction to action. For a bold European Energy Union innovation strategy, 2016.

(13) See innogy website: <https://iam.innogy.com/en/about-innogy/webstories/digitalisation-of-the-energy-sector>

(14) Capgemini Consulting analysis: best performers regarding cost-to-serve all use digital channel in more than 50% of their customer contacts.

(15) Energy consumption monitoring solution. Greenely’s CEO, Tanmay Bari, was nominated in Forbes “30 under 30 Europe” in 2016.

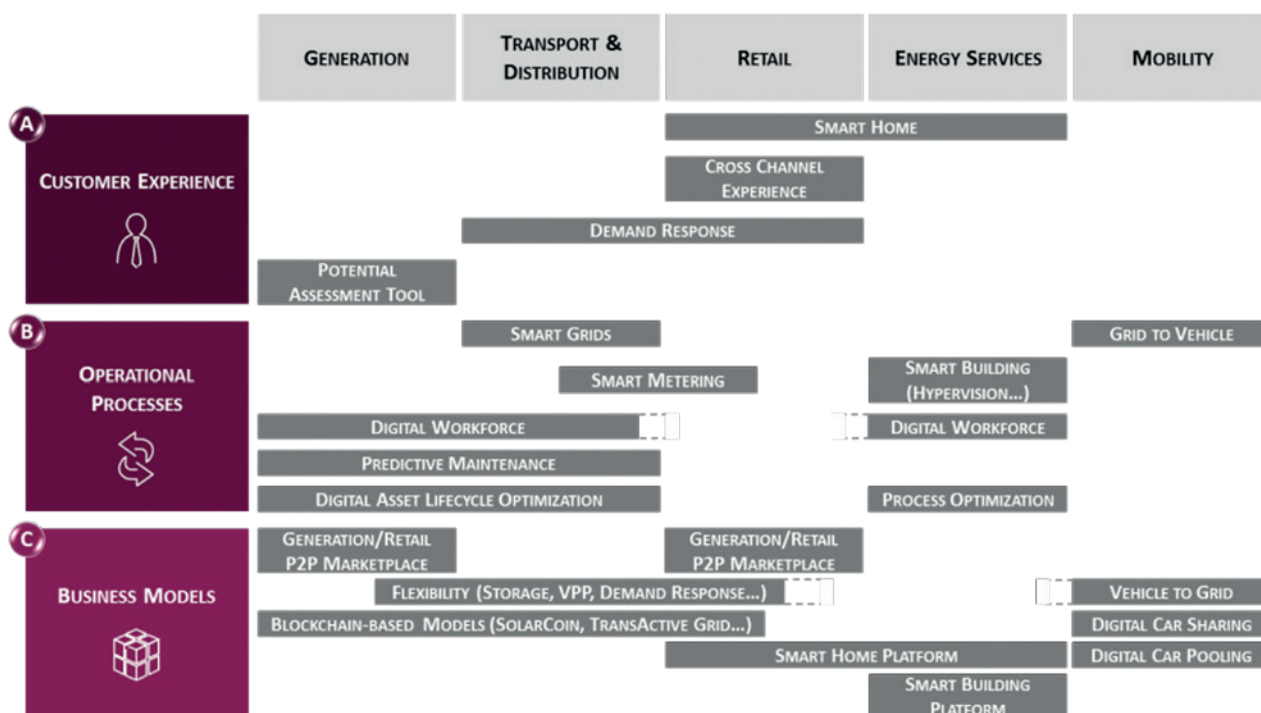


Figure 2: illustrations of Digital levers for the energy transition (not exhaustive).
Source: Capgemini Consulting.

“Digitalization is the catalyst for improved situational awareness. It helps customers reach their energy objectives – enhancing energy efficiency, sustainability, resiliency, and security – in alignment with their business objectives*.”

**Emmanuel Lagarrigue, Chief Strategy Officer,
Schneider Electric**

() To do so, Schneider Electric's IoT platform, EcoStruxure, provides buildings, industry processes, datacenters and the grid with a way to achieve their digital transformation.*

Digital operations improve the integration, performance, integrity and security of energy assets and workforce

Given that the energy sector is particularly asset-intensive, applying digital levers to the operation of these assets is especially valuable at all stages of the energy value chain, from power generation to consumption. For networks and decentralized infrastructures (transport, distribution), digital technologies, like advanced data analytics, can be applied to real-time process controls or losses management, remote field interventions or predictive maintenance. For decentralized energy equipment (RES, energy services), technical centers can be used to support interventions on the field, enhance energy efficiency and service quality.

Applying digital to operations, meanwhile, enables innovative responses to energy-related companies' challenges. The benefits include: integrating more renewables into the system, increasing safety levels, optimizing costs,

maximizing profitability and enhancing the quality of service (QoS) or the reliability of the assets. A variety of technology levers are available:

- **Digital cockpit**, process control automation/optimization (IoT, big data & analytics, radio-frequency identification (RFID), machine to machine (M2M)) can help monitor, optimize and simulate real-time power flows on a system, such as the artificial intelligence solution of the company DCbrain;
- **Smart interfaces for digital workforces** (mobile solutions for planning and dispatching, route optimization, remote support to field intervention, augmented and virtual reality, robotics and drones) can improve operator interaction with on-site assets or equipment, improve spare part sizing and availability, enhance intervention quality first time, optimize workload management, and perform dangerous tasks more safely and quickly;
- **Online collaboration platforms** and tools (remote, extended enterprise) can offer different ways of working within the company and with external partners, and facilitate collaboration in multi-site environments;
- **Asset optimization** (IoT, big data & analytics, simulation/modelling, cloud, artificial intelligence) helps anticipate failure, predict behaviour, and optimize maintenance and investment plans.

Over the last 2 years, most energy-related companies (covering generation, T&D, services, etc.) have begun to acknowledge the benefits of these digital operations levers. Many actors are now moving fast and making significant investments. For example, French transmission system operator (TSO) RTE⁽¹⁶⁾ has made digital a strategic

axis and dedicated part of its Capex to digital. RTE aims to invest 10-20% of its annual network investment in digital solutions, with the goal of building the first European smart electricity network.

New digital business models create value focused on data, decentralized opportunities, and flexibility

Digitalization is fostering the transition of the energy sector from a product-centric to a solution-oriented approach combining connected products and services in a way that is more conducive to decarbonization. As part of this, digitalization is enabling a wide spectrum of new business models. In particular, three types of activities are emerging.

Data collection and analysis are key aspects of value creation

One of the key challenges for energy companies is to maintain their customers' loyalty. Gaining more consumer insights is an important part of the new data-centric value chain. For instance, Eneco, with its "Toon" smart home platform (Smart thermostat, Solar PV management, EV charging and household equipment management) installed in more than 400 000 households, now collects exponentially increasing volumes of data. It has leveraged Toon to pivot its business model, becoming a data-centric smart services company. Eneco positions itself as an orchestrator of the Smart Home platform while opening its Open Application Programming Interface (API) to other stakeholders providing non-related energy services to end users (such as security, fire detection, transports or weather information).

GE has also developed a data-centric model with its Predix solution, a cloud-based platform that collects data from industrial utilities (Turbines, Boilers, Water treatment plants...) or process equipment (Distillation tower, Hoven, Assembly lines...) and enables large-scale analytics for asset performance management.

Digital transformation and technological enablers boost the creation of local energy business models

New entrants to the energy supply market and peer-to-peer marketplace are at the forefront of the decentralization movement. The first category includes new independent energy suppliers, local authority-owned utilities and community-owned utilities. Their solutions use digital assets either to optimize costs or to better manage power flows. For example, TexelEnergie in the Netherlands, is gradually transforming Texel Island (13,600 inhabitants) in a self-sufficient energy community with locally generated renewable energy and microgrids.

The second category consists of platforms that bypass traditional retail utilities by connecting energy producers and consumers. Notable examples from different countries are SonnenCommunity, Vandebrom or TransActive Grid.

SonnenCommunity is a virtual power plant that connects a German-wide community of distributed generators and energy storage users.

Vandebrom, a Dutch startup, offers a peer-to-peer platform that enables consumers to buy electricity directly from independent producers.

TransActive Grid is a New York peer-to-peer platform without any central coordination enabled by the blockchain technology⁽¹⁷⁾.

“End users are now expecting digital integrated turn-key energy solutions. Acknowledging these growing needs, we have proposed a new data management platform and web services mixing energy supply, consumption monitoring or advanced invoicing services. Doing so, Primagaz has completely reconsidered its business model* working internally in parallel on a revised target operating model to supply gas.”

Yves Michel, Primagaz CIO and Caloon CEO

() with its Caloon offer.*

Flexibility (in particular demand response and energy storage) offers new perspectives for grid balancing

The European demand response market is attracting tech start-ups, which see its high growth potential due to growing peak electricity demand and narrowing capacity margins. In 2015, Tempus Energy (UK) started encouraging customers to move their energy usage away from peak demand periods to times when cheap renewable generation is available⁽¹⁸⁾. To do so, digital technology is needed to collect and analyze the data and to inform customers in real-time.

“Digital will ultimately transform Grid architectures requiring to deploy, with the support of European institutions and public authorities at a country level, new flexibility market platforms, which will enable transactions Horizontally (across Countries and Regions) as well as Vertically (from Prosumer and Microgrids into Grid balancing mechanisms). ENTSO-E and Grid Operators are preparing to facilitate the emergence of such new “App Stores” across the energy value chain.”

Laurent Schmitt, Secretary General, ENTSO-E

New energy storage developments, enabled by digital tools, introduce unprecedented opportunities for producers, customers, potential third-party operators, and even DSOs. For example, Orange's thousands of batteries (located at 7000 telecom facilities), combined with Actility's digital technologies, in partnership with French TSO and DSO, have enabled to provide and activate a flexibility capability in response to spikes in energy demand. The intelligence of the IoT allows coordinating the power storage of 7000 sites in minutes, providing flexibility to the system operator.

(16) *Enerpresse* n° 11612, 2016.
 (17) A blockchain is a distributed digital database that maintains a continuously growing list of ordered records called blocks. Each block contains a timestamp and a link to a previous block. In the case of Transactive Grid, the blockchain supports the transactions of power and money (or here a crypto-currency called token).
 (18) Verdantix, “Innovation and Disruption in the Global Utility Ecosystem”, 2016.

Operating models of energy and non-energy actors are changing to take advantage of opportunities

Internally, companies' operating models are changing rapidly

Major companies are adapting their organizational structures and creating new business units dedicated to the energy transition. They are also empowering themselves with dedicated digital-related capabilities and skills. Focusing on organizational structures, there are numerous European and global examples, such as Total and Shell... Radical steps have also been taken by E.ON and RWE in Germany. Both energy giants have separated their fossil fuel assets from their energy transition activities: renewable assets, smart energy networks, and downstream activities in charge of digital energy services.

Companies are also recognizing a need to build new capabilities (such as IoT and machine-to-machine expertise, data science or cybersecurity) and creating new C-level positions within their organizations to do so. In 2015, Chief Digital Officer positions were created in many companies such as in Enedis, Enel Green Power, Enel, GE, Total (which also created a new role of Chief Data Officer) or Engie. Gartner estimates that 90% of large organizations will have a Chief Data Officer by 2019⁽¹⁹⁾.

"The energy sector is facing considerable changes at a fast pace. Consumers are now expecting comprehensive low carbon solutions integrating digital energy efficiency services. To meet customer expectations, Total has drawn a new ambition with, notably, the creation of its GRP division dedicated to Gas, Renewable, Low Carbon Solutions and Smart Energy services".

Jérôme Schmitt, Senior VP Innovation & Energy Efficiency, Total Gas, Renewables & Power.

External collaboration models are also changing with enlarged innovation ecosystems

To develop new, digital-related, products or solutions, many companies have launched new initiatives that bring together a wide range of actors such as start-ups, engineering companies, equipment providers, research institutes or Telco and new technology firms.

Numerous companies (such as ENGIE with its OpenInnov, EDF with Pulse, Enel, Endesa, Iberdrola) have implemented start-up incubators or programs to stimulate innovation. Enel's Spanish subsidiary Endesa launched an open innovation platform, Endesa Energy Challenges, in October 2015. Its initiatives included a Datathon (that challenged the global community of big data experts to transform the future of energy in Spain) and a Hackathon (that challenged young talents from various fields to design innovative mobile solutions to help customers optimize energy consumption). Similarly, the Iberdrola Energy Challenge was launched in 2016, with the support of KIC InnoEnergy, to create new responses to Europe's energy situation.

Likewise, many innovative energy solutions are being driven or tested at city or district level. These include energy efficiency initiatives, electricity, heating and cooling supply systems, and the integration of renewables in the built environment⁽²⁰⁾. Local and regional public authorities have been key initiators or enablers of wider innovation energy ecosystems, which are central to smart city initiatives that combine energy, transport and urban planning. For example, the city of Barcelona, involving citizens, public and private companies, is thought to be on its way to energy autonomy, powered by advanced analytics and energy management solutions. Vienna is positioning itself as a leader in the electric vehicle space with more than 400 charging stations. The North Sea Region academic network has developed a customization process that monitors and evaluates the consumption of energy and carbon emissions in proposals for building retrofit.

Facilitators such as the EU's Knowledge and Innovation Community (KIC) InnoEnergy⁽²¹⁾ as well as NUMA, are also playing central roles in supporting startups by connecting them to large corporates and cities and build synergies for activities related to energy, transport and smart cities. Their aim is notably to combine the speed and innovative capacity of start-ups with the critical mass of big organizations, be they public (e.g. cities) or private (e.g. corporates).

Finally, financial institutions such as the EIB and CDC, in France, are also supporting the energy transition – be it through match-making, incubating, or pooling projects. The CDC, and the EIB through its targeted technical assistance programs such as the ELENA (European Local Energy Assistance) facility or the European Investment Advisory Hub have begun to support cities and regions in securing investment for projects that deploy energy-related innovations and the aggregation of small, dispersed low carbon projects. Private banking institutions are also playing in this space, such as BNP-Paribas with its Sustainable Finance initiatives and dedicated business unit.

"Digitalization is clearly a key enabler to accelerate the transition to a low carbon economy. Major financial institutions have launched large programs to boost financing of renewable energy projects and beyond. As part of our commitments towards digitalization and the energy transition, we have decided to invest 100 million Euros in clean startups dedicated to energy storage and smart grid".

Virginie Pelletier, Head of Sustainable Finance & Investment at BNP Paribas CIB.

(19) <http://www.gartner.com/newsroom/id/3190117>. All these positions are supported by data scientists, who ensure data security and create mathematical models translating operational issues into actionable solutions.

(20) Capgemini, *European Energy Markets Observatory, 18th Edition, 2016*.

(21) KIC InnoEnergy supports entrepreneurs and startups building sustainable businesses that expand and enhance Europe's ecosystem (133 supported as of May 2016). It connects innovators and business partners by investing in commercially viable products and services (71 launched as of May 2016) and runs Master's, PhD and further educational programs at European universities.

To reap the benefits of this fast growing business, more needs to be done

Digitalization is pushing companies in the energy sector to innovate and adapt. Yet to foster and accelerate the energy transition, energy-related companies now need to fully embrace the opportunities offered by digital ranging from best-of-breed customer experience to operations excellence and to disruptive business models, some examples of which are discussed above.

Europe has clear strengths in this area. However, it has not yet fully exploited the potential of digital technologies for revolutionizing all aspects of the energy-innovation value chain. At the European level, the measures envisaged under the Digital Single Market Strategy will need to be better linked with Europe's Energy Union. Full mastery of digital technologies and their various applications – which includes addressing concerns over data security, privacy, ownership and access – is a prerequisite for remaining at the forefront of the shift to the mixed products/services model that will set off the next wave of innovation in the energy sector.

A blend of promotional, incentivising and regulatory policies will also be needed to ensure the maximum private

and public good from the “digital hand”. Governments will need to provide a sound regulatory environment for dealing with quickly evolving technologies and business models, and it will be important that there be a close and continuous dialogue between policy makers and energy actors to ensure that unnecessary barriers are avoided. Particularly important on the regulatory side will be the new competition policy concerns that digitalization brings, as well as ensuring the right level of standardization to ensure interoperability between countries. Governments will also have a key role to play in building the right skills to set off the next wave of energy intelligent startups as well as additional digital infrastructure.

Finally, for Europe to benefit from this mega-trend at home, as well as exporting its know-how internationally, a wide range of multi-stakeholder and multi-sector collaborations will be essential. Beyond national governments, cities must continue to drive digitalization at a faster pace. Companies and industries increasingly understand that the complexity of today's world means that no single company can come up with a complete solution. A wide variety of actors from a diverse group of different business sectors, civil society as well as cities and households need to cooperate and will be central to a successful transition.

Peut-on croire aux TIC « vertes » ?

Par Fabrice FLIPO

Philosophe des sciences et des techniques, Mines-Télécom/TEM, Laboratoire LCSP

Le numérique semblait être arrivé à point nommé pour répondre aux enjeux de développement durable et apporter cette « maîtrise de la maîtrise » que Michel Serres appelait de ses vœux dans le *Contrat naturel*. Aujourd'hui, il paraît plutôt être mis au service de la seule croissance économique.

En 1990, le numérique était presque inexistant. Sept ans plus tard, ce sont plus d'un million de sites qui sont recensés. Apparaît ensuite un discours bien séduisant : une « nouvelle économie », « immatérielle », car tirée par l'information, serait en voie d'émergence. Les TIC (technologies de l'information et de la communication) apporteraient « la maîtrise de la maîtrise » recherchée par Michel Serres dans son *Contrat naturel* : « *Le salut de la planète, la cohésion sociale et la reprise de la croissance sous une nouvelle forme semblent passer par la réussite et la vitesse de cette révolution* »⁽¹⁾.

Mais, en 2007, le cabinet d'études Gartner estime que le secteur des TIC est à l'origine de 2 % des émissions globales de gaz à effet de serre, soit autant que l'aviation civile. Ce chiffre émeut le secteur, qui répond que se concentrer sur ces 2 %, c'est oublier les 98 % restants pour la réduction desquels les TIC sont une solution. Le potentiel mondial de cette réduction serait de 15 %, d'ici à 2020⁽²⁾.

Ces chiffres sont en grande partie repris par les autorités publiques, et même par certaines ONG. Sont-ils fondés ?

Cet article soutient que tel n'est pas le cas, pour une raison principale : ils s'appuient sur des scénarios d'ingénieur reposant sur des hypothèses sociales, économiques et politiques non problématisées. La question écologique est abordée comme un problème pouvant être traité de manière sectorielle, sans intégration plus vaste, ce qui occulte les moteurs principaux de la consommation et de la production. Cette faiblesse est d'ailleurs reconnue par le rapport du GeSI, qui indique que l'effet rebond n'a pas été pris en compte dans les analyses : « *The calculated abatement results in this report do not include rebound effect* » (p. 54), étant supposément trop difficile à modéliser. L'analyse interdisciplinaire des jeux d'acteurs permet de lever cette difficulté et de mettre en évidence les déterminants de l'évolution des TIC⁽³⁾.

Le contexte et la problématique

Les TIC d'un côté, le développement durable de l'autre

La question des TIC « vertes » se construit à l'interface entre le numérique et le développement durable. Vue de loin, les liens entre les deux semblent évidents : le rapport

du MIT au Club de Rome a été un pionnier dans l'utilisation de modèles numériques qui se sont généralisés depuis ; la Terre est sans cesse observée par de multiples satellites ; la mondialisation n'aurait pu se faire sans les facilités offertes par les TIC ; etc. Pourtant, les deux domaines se sont construits de manière largement disjointe, que ce soit au niveau des négociations internationales, des ministères, des réglementations, et même des mouvements associatifs. Au sommet de Rio, en 1992, tout comme à la Conférence Rio+20, les TIC ne sont évoquées que très marginalement. De la même façon, les différents sommets de régulation de la société de l'information n'abordent jamais la question écologique. Dans divers documents de la littérature grise, économique et technique, se développe, par contre, l'idée que la croissance pourrait être dématérialisée ou découplée de l'empreinte écologique, et que les TIC seraient à cet égard un levier essentiel. La stratégie de Lisbonne (adoptée par l'Union européenne en 2000) s'appuie ainsi sur l'usage massif des TIC pour initier une « croissance verte », évoquée dès le rapport Nora-Minc, en 1978.

L'équipement des ménages

Plus d'une personne sur deux est équipée d'un *smartphone*, mais 3 téléphones sur 4 achetés en 2014 ont été des *smartphones*⁽⁴⁾. 90 % des ménages possèdent un ordinateur fixe, 90 % possèdent également un téléphone fixe. 92 % des ménages ont un téléphone mobile. 83 % ont Internet. 35 % ont une tablette (un taux en forte croissance). La situation la plus répandue est celle d'un triple équipement en ordinateur-tablette-*smartphone* (30 %, +5 %), devant le double équipement ordinateur-*smartphone* (29 %). Seuls 11 % ne disposent d'aucun équipement. Les usages les plus cités du *smartphone* sont la navigation sur Internet (55 %, +3 %), le téléchargement d'applications (48 %, +4 %), la géolocalisation (42 %) et le visionnage de vidéos sur mobile (34 %). 32 % des individus utilisent des messageries instantanées. Les usages sont généralement plus répandus chez les adolescents (12-17

(1) FAUCHEUX S. et al. (2010), TIC et développement durable. Les conditions du succès, Bruxelles, De Boeck.

(2) GeSI, Smarter 2020, 2012.

(3) FLIPO F. et al. (2012), « Peut-on croire aux TIC vertes ? », Presses des Mines, La Face cachée du numérique, L'Échappée (2013) (les données ont été mises à jour pour cet article).

(4) Credoc Baromètre du numérique 2016.

ans). Les taux d'utilisation s'élève également avec le niveau de revenus et de diplômes. La région parisienne et les régions urbanisées sont plus utilisatrices que les zones rurales. En quatre ans, le temps passé sur Internet est passé de 13 heures par semaine à 18 heures. 59 % des Français y recourent pour suivre l'actualité (+10 % par rapport à 2012), mais la télévision reste en première place pour comprendre l'actualité. L'usage des procédures administratives en ligne a également progressé. On compte également 3 fois plus de sites marchands qu'en 2009. Le pourcentage de personnes considérant qu'il est « très important » ou « assez important » d'avoir accès à Internet passe de 54 % en 2009 à 65 % en 2016 (72 % en région parisienne). Chaque foyer français possède en moyenne 99 équipements électriques et électroniques, représentant 450 kg par foyer⁽⁵⁾.

Une écologie des infrastructures numériques

Les données sur l'écologie des infrastructures numériques sont à la fois nombreuses (des centaines de références), disparates (périmètres, méthodologies, etc.) et insuffisantes (elles sont loin de couvrir tout le champ). Nous ne pouvons en donner ici qu'un aperçu assez limité (le lecteur pourra se reporter à nos ouvrages ou à d'autres sources⁽⁶⁾ pour davantage de détails).

Les TIC représentent entre 5 et 10 % de la consommation mondiale d'électricité⁽⁷⁾. En France, c'est autour de 14 %, soit la production de sept réacteurs nucléaires, et 5 % des émissions de gaz à effet de serre⁽⁸⁾. La consommation mondiale a progressé de 6,6 % par an sur la période 2007-2012. En France, cette croissance serait de l'ordre de 10 % par an, et a représenté, entre 1990 et 2005, un accroissement de 635 kWh par ménage et par an, annulant les gains énergétiques obtenus, sur la même période, sur tous les autres équipements énergétiques domestiques (réfrigérateurs A++, etc.)⁽⁹⁾. Les plus gros postes de consommation sont la fabrication des appareils, le réseau et les terminaux (par contre, la fin de vie des équipements a généralement peu d'incidences énergétiques).

Sur les aspects « matière », le secteur des TIC représente 30 % de la demande mondiale de minerai d'argent, 12 % de celle d'or, 30 % du cuivre et jusqu'à 80 % de ruthénium ou d'indium, selon Umicore⁽¹⁰⁾, leader mondial du recyclage. Des ruptures temporaires d'approvisionnement se sont déjà produites. Certaines filières, comme celle du coltan, alimentent des guerres. Les risques pesant sur l'approvisionnement ont conduit la Commission européenne à classer les métaux utilisés dans les TIC dans la catégorie « à risques élevés »⁽¹¹⁾.

Le flux des déchets électroniques croît de 3 à 5 % par an en France. 1,7 million de tonnes ont été mises sur le marché en 2015 (soit 166 fois le poids de la Tour Eiffel). 35 % sont collectés, desquels 80 % de la matière est récupérée, le reste étant mis en décharge ou étant incinéré – ce qui donne un taux de recyclage effectif de moins de 30 % (en supposant que tout le recyclage est aux normes). 1 % seulement est réutilisé⁽¹²⁾. Enfin, les TIC utilisent des produits toxiques, incorporés (retardateurs de flammes bromés, phtalates, chrome hexavalent ou béryllium) ou servant à leur fabrication (solvants, acides, métaux lourds, composés organiques volatils, notamment).



Photo © Raphael Demare/REA

Concassage d'éléments électroniques dans une usine d'Umicore (en Belgique).

« Le flux des déchets électroniques croît de 3 à 5 % par an en France. 1,7 million de tonnes ont été mises sur le marché en 2015 (soit 166 fois le poids de la Tour Eiffel). 35 % sont collectés, desquels 80 % de la matière est récupérée. »

Le positionnement des principaux acteurs

Les acteurs se mobilisant autour des TIC « vertes » nous ont paru pouvoir être regroupés en cinq catégories idéal-typiques : les équipementiers et les distributeurs, les associations écologistes et les autorités publiques et, enfin, les consommateurs.

Les fabricants cherchent d'abord à respecter une réglementation dont ils ont largement élaboré les termes : EuP, DEEE et ROHS. En allant plus loin, ils vont vers l'efficacité énergétique qui comporte de nombreux aspects positifs, tels que, par exemple, les gains en autonomie des batteries. L'éco-conception est marginalisée au sein et hors des grands ac-

(5) Ademe, rapport annuel du Registre des déchets d'équipements électriques et électroniques, 2016, p. 38.

(6) Voir notamment : www.ecoinfo.cnrs.fr ; également, HILTY L. M. et AEBISCHER B. (Eds.), 2015, ICT innovations for sustainability, Springer.

(7) LANNOO B. (Ed.) (2013), Overview of ICT energy consumption, Network of Excellence in Internet Science, FP7 ; MILLS M. (2013), The cloud begins with coal, Report, Digital Power Group.

(8) BREUIL H. et al. (2008), TIC et développement durable, rapport du CGEDD et du CGTI.

(9) Enertech (2008), Mesure de la consommation des usages domestiques de l'audiovisuel et de l'informatique, projet Remodece.

(10) HAGELÜKEN C. (2008), "Mining our computers", Electronic goes green 2008+ Symposium, Berlin.

(11) https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_fr

(12) Ademe (2016), op. cit.

teurs, à l'exemple du *Fairphone*. Le modèle privilégié par les distributeurs est le recyclage, comme pour les fabricants : récupération, destruction, fabrication de matières premières secondaires et mise sur le marché de nouveaux appareils ; le réemploi est donc lui aussi marginalisé. Les nouveautés permettent de gagner des nouveaux clients, d'où un encouragement à l'obsolescence commerciale : les appareils sont techniquement capables de durer de trois à quatre fois plus longtemps que leur vie réelle, qui est de 18 mois. Les opérateurs estiment que le « vert » ne fait pas vendre ; l'idée est cependant que le « vert » pourrait être un facteur différenciant, si les consommateurs le voulaient⁽¹³⁾.

Côté associatif, Greenpeace a mené des actions contre des fabricants, notamment HP et Apple, autour de l'exportation des déchets électroniques dans des pays pauvres, en montrant que si Internet était un pays, il serait le 5^{ème} consommateur mondial d'électricité, et en poussant les grands utilisateurs de serveurs (Facebook, Google, etc.) à utiliser de l'énergie renouvelable, avec un certain succès. Le WWF a développé un partenariat avec Orange sur l'évaluation environnementale des produits. France Nature Environnement s'est fortement mobilisée pour la mise en place de la directive DEEE (relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques). Les Amis de la Terre ont pointé du doigt l'obsolescence accélérée, demandant des garanties plus longues ou l'obligation, pour les producteurs, de continuer à fabriquer des pièces détachées.

Du côté des autorités publiques, le soutien et la régulation du numérique (*e-santé*, *e-learning*, *e-inclusion*, etc.) se trouvent largement disjoints du développement durable et de l'écologie, on l'a vu. Dans l'initiative « i2010 : la société de l'information et les médias au service de la croissance et de l'emploi », l'écologie n'apparaît que sous l'angle de l'efficacité énergétique (notamment : voitures et infrastructures de transport intelligentes). La Commission européenne a des positions proches de celles des industriels. Le constat est similaire au niveau de l'État français. Breuil *et al.* (2008) prennent acte des impacts, mais concluent que « les TIC offrent ainsi de multiples opportunités pour répondre à l'objectif ambitieux de réduction de la consommation énergétique que s'est fixé la France ».

Tous se tournent vers le consommateur, lorsqu'ils veulent ou disent vouloir encourager l'écologisation des produits⁽¹⁴⁾. Pourtant le débat et les enjeux lui échappent largement. Le premier lien spontané entre les TIC et l'environnement concerne les ondes électromagnétiques. Un second enjeu est le déchet : l'objet en fin de vie est jugé problématique et stocké, plutôt que jeté dans le tout-venant. La consommation d'énergie est citée, mais le propos reste vague, avec la conviction qu'elle est faible. L'objet est jugé techniquement trop complexe pour être évalué. Interrogé sur ce que pourrait être une TIC « verte », l'alimentation en électricité solaire émerge en premier. L'avis qu'une TIC écologique est impossible s'exprime facilement, non sans contradiction, néanmoins, avec la foi dans des solutions qui seront inventées par les ingénieurs. Enfin, vient l'idée d'appareils plus simples et plus rustiques, et réparables. Les TIC ne sont guère remises en question dans leurs fonctionnalités. Elles apparaissent comme des outils indispensables, familiers,

comme une extension de notre corps, dont nous aurons désormais du mal à nous passer.

Conclusions

L'argument majeur avancé par le rapport Smarter 2020 est la substitution : le remplacement de biens et services physiques par des biens et des services « immatériels ». Dans le détail, l'argument s'avère peu convaincant. L'étude attentive des exemples mis en avant (visioconférence, e-commerce, *e-paper* ou télétravail) montre que les raisonnements dépendent d'évolutions individuelles et collectives dans les usages⁽¹⁵⁾. Or, celles-ci vont croissant, puisque tel est l'objectif des politiques publiques et des acteurs principaux. Les grands acteurs n'ont nullement pour stratégie de vendre moins ; comme on peut s'y attendre, « l'effet rebond » se produit.

Les acteurs s'accordent sur la manière de cadrer l'enjeu des TIC « vertes » en fonction de trois critères (matériaux, énergie et toxiques) et de trois stratégies (réduction, substitution ou interdiction). Mais ils divergent sur les priorités à établir. Quel acteur est prêt à réviser ses « besoins » ? Les vendeurs ? Les consommateurs ? Les classes modestes ont tendance à penser que les changements devraient concerner en premier lieu ceux qui en ont les moyens et qui ont le plus d'impact relatif. En retour, l'argument est facilement malthusien : certes, les riches consomment plus, mais les pauvres sont plus nombreux ; c'est donc le mode de vie de « tous » qu'il faudrait réformer. Ces différences se retrouvent à l'échelle internationale, entre pays du Nord et pays du Sud. D'où un report de la responsabilité : les entreprises attendent un marché adapté à leur savoir-faire ; les consommateurs un produit qui ait les fonctionnalités souhaitées et soit certifié « vert » par un tiers de confiance ; et les autorités publiques attendent des entreprises une solution technique.

Face à ce qui consiste pour l'essentiel en des scénarios d'ingénieur largement coupés de toute prise en compte de la dynamique des sociétés contemporaines, croire aux TIC « vertes » se révélera sans doute très décevant. Notre cadre d'analyse comme sa conclusion sont d'ailleurs assez largement transposables à d'autres problématiques similaires : voiture « verte », avion « vert », etc. Le « verdissement » (ou l'« écologisation ») de nos sociétés s'en remet souvent à des dispositifs techniques qui laissent dans l'ombre les dynamiques économiques et sociales, qui sont pourtant les moteurs de l'action et qui ne sont pas ignorées des citoyens. Au contraire, le caractère contradictoire des injonctions dont ils sont les destinataires (consommer « plus » pour l'économie, et « moins » pour la planète) ressort tout particulièrement à leurs yeux, puisque ce sont eux qui sont à la croisée des chemins. Dès lors, un risque existe que les citoyens se sentent trahis et qu'ils finissent par retirer la confiance qu'ils ont accordée.

(13) ROCHEFORT R. (2007), *Le Bon consommateur et le mauvais citoyen*, Paris, Odile Jacob.

(14) DOBRÉ M. et JUAN S. (2009), *Consommer autrement. La réforme écologique des modes de vie*, Paris, L'Harmattan.

(15) *Ce que disait déjà Bio IS (Bio Intelligence Service) (2008)*, Impacts of ICT on energy efficiency, report to European Commission DG INFOS.



Sans ingénieurs talentueux,
les voitures autonomes
n'iraient pas bien loin.

IL FAUT DU TALENT POUR RENDRE LES VOITURES PLUS INTELLIGENTES

Aide au stationnement, systèmes de correction de trajectoire, conduite automatisée... Valeo innove pour permettre aux voitures de demain d'être plus autonomes. Retrouvez-nous sur **valeo.world**

Valeo
SMART TECHNOLOGY
FOR SMARTER CARS*

VALEO INNOVE ET DÉVELOPPE LES TECHNOLOGIES DE LA VOITURE DU FUTUR

Face à la nécessité de réduction de CO₂ et de NO_x, à l'évolution de la voiture autonome et à la digitalisation de la mobilité, l'industrie automobile fait aujourd'hui face à de grands bouleversements. Leader sur l'ensemble de ces domaines, l'équipementier automobile français **Valeo** innove et développe les technologies de la voiture du futur. Entretien avec Jacques Aschenbroich, PDG.



Jacques Aschenbroich
PDG



Sur quels exemples de produits utiles innovez-vous aujourd'hui ?

L'industrie automobile fait face à trois révolutions simultanées. C'est unique et sans précédent. On assiste d'abord à un bouleversement des motorisations, avec la baisse du diesel, la montée en puissance de l'électrique et de l'hybride. L'avènement de la voiture autonome constitue la deuxième vague de changement. La troisième transformation est celle du numérique qui fait émerger de nouvelles formes de mobilité. Valeo se trouve au cœur de ces trois révolutions.

Nos innovations permettent de réduire les émissions de CO₂ des voitures à travers l'électrification de la chaîne de traction, avec des solutions pour tous les types de véhicules.

En matière de véhicule autonome, nous produisons toute la gamme de capteurs (capteurs ultra-sons, caméras, lasers, scanners, radars...), qui sont les yeux et les oreilles du véhicule, ainsi que les logiciels qui permettent de fusionner ces données, comme le cerveau fait la synthèse des différents sens.

Valeo développe enfin des solutions digitales donnant la possibilité aux acteurs de la mobilité de proposer de nouvelles offres, à l'instar de la clé virtuelle que nous avons développée et qui peut être transmise de smartphone

à smartphone. On voit bien comment cette technologie digitale peut bouleverser les usages, encourager l'auto-partage ou encore transformer le métier de location de voiture.

Vous regroupez environ 100 000 collaborateurs à travers le monde, réalisez un chiffre d'affaire de plus de 16 milliards d'euros et souhaitez d'ici 4 ans atteindre les 27 milliards. Comment parvenez-vous à rester agile et à vous renouveler malgré la taille du groupe ?

Notre force réside en notre capacité à mobiliser très rapidement des ressources financières et humaines dans le cadre de nos projets d'innovations et d'investissements, et cela, grâce à la mise en place depuis notre réorganisation en 2009 de circuits de décisions courts. La taille du groupe ne doit pas être source de bureaucratie. Notre organisation nous permet ainsi de croître sans empiler les niveaux hiérarchiques. Nous sommes passés de 45 000 en 2009 collaborateurs à 102 000 le mois dernier sans modifier nos circuits et nos structures. En 2021, nous regrouperons probablement 130 000 ou 140 000 collaborateurs et nous aurons toujours les mêmes circuits de décisions. Nous préserverons ainsi notre agilité !

L'an dernier, 1,6 milliard d'euros ont été investis en R&D et 1 800 brevets ont été déposés à travers le monde. En quoi l'innovation est-elle elle essentielle dans la stratégie de développement de Valeo ?

Dans notre métier, les prises de commandes d'aujourd'hui représentent la croissance de demain. Entre les commandes effectuées et la livraison, il existe un délai de deux ans environ consacré au développement technique des projets. Les prises de commandes de l'année dernière représentent 1,7x notre chiffre d'affaire, dont 50 % de produits innovants. L'innovation et nos dépenses de R&D nous donnent clairement le potentiel d'innovation dont nous avons besoin pour croître de l'ordre de 10 % par an dans les années qui viennent.

Valeo
SMART TECHNOLOGY
FOR SMARTER CARS

VALEO
43 rue Bayen
75848 Paris Cedex 17

Gouverner les politiques de l'eau

Par Aziza AKHMOUCH

Responsable du programme sur la gouvernance de l'eau de l'OCDE

et Delphine CLAVREUL

Analyste des politiques se rattachant au programme sur la gouvernance de l'eau de l'OCDE

Le changement climatique, les pressions démographiques et l'urbanisation croissante représentent pour les décideurs, partout dans le monde, des enjeux considérables en matière de gestion de l'eau. Les caractéristiques intrinsèques de la gestion de l'eau – multi-échelles, multi-acteurs, multi-temporelle – et ses externalités très fortes dans des domaines aussi essentiels que la santé publique, l'agriculture, l'énergie et le développement territorial font de sa « gouvernance » une condition de succès essentielle à l'élaboration et à la mise en œuvre de politiques publiques contribuant au développement économique des territoires, à la préservation de l'environnement et au bien-être des citoyens. Depuis 2010, l'OCDE conseille les gouvernements, à tous les niveaux, sur la façon de concevoir et de mettre en œuvre les politiques de l'eau, notamment depuis l'adoption des principes de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau, qui visent à améliorer les systèmes de gouvernance pour permettre de gérer les ressources en eau en trop grande ou en trop faible quantité, ou de trop mauvaise qualité, de manière durable, intégrée et inclusive.

De la nécessité d'une gouvernance résiliente pour faire face aux défis futurs

Les projections à l'horizon 2050 rappellent qu'avec une population mondiale de 9,7 milliards de personnes et une demande en eau globale qui aura augmenté de 55 %, les conflits d'usages seront inévitables sans une transition sérieuse d'une gestion de crises vers une gestion des risques (OCDE, 2012a). Les risques d'inondation, de sécheresse, de pollution, ainsi que la capacité de garantir la couverture universelle des services d'eau et d'assainissement sont d'autant plus considérables que les ressources en eau sont déjà surexploitées ou font l'objet de prélèvements excessifs dans de nombreuses régions du monde. Par ailleurs, 4 milliards de personnes vivront dans des zones de stress hydrique, y compris dans des pays actuellement riches en eau, comme en témoigne la récente crise de l'eau potable qui a affecté tant Rio de Janeiro que São Paulo, au Brésil.

Dans ce contexte, aucun pays ne peut considérer son niveau actuel de sécurité hydrique et de prestation de services comme étant acquis ; et tous les pays doivent anticiper les tensions futures et conduire, dès aujourd'hui, les réformes nécessaires pour pallier des déficits qui s'exacerberont demain. Relever les défis de l'eau actuels et futurs exige des politiques publiques robustes, qui ciblent des objectifs mesurables inscrits dans des calendriers prédéterminés, à l'échelle appropriée, qui s'appuient sur une répartition claire des tâches entre les autorités responsables et qui fassent l'objet d'un suivi et d'une éva-

luation réguliers. Une gouvernance de l'eau efficace, efficiente et inclusive contribue à l'élaboration et à la mise en œuvre de ces politiques publiques dans un partage des responsabilités entre les différents niveaux de gouvernement et une coopération avec les parties prenantes.

En 1977, la Conférence des Nations Unies sur l'eau, à Mar del Plata (en Argentine), marqua un tournant dans les politiques de l'eau en reconnaissant la nécessité de passer d'une gestion de l'offre à une gestion de la demande en eau. Les solutions « techniques » jusque-là privilégiées par l'ingénierie hydraulique devaient dès lors être accompagnées d'institutions solides et d'instruments économiques capables de refléter les réalités du terrain, de coordonner les acteurs à différentes échelles, de collecter les ressources financières nécessaires et d'assigner une valeur à l'eau pour en encourager un usage rationnel. En 1992, les « Principes de Dublin » apportaient les premières normes universelles de gouvernance de l'eau basées sur une « gestion intégrée des ressources en eau ». Au cours des deux décennies qui ont suivi, la perception croissante d'une crise de l'eau a entraîné une prolifération de la littérature sur la gouvernance de l'eau, laquelle a été récemment synthétisée dans un ouvrage coécrit par Woodhouse et Muller (2017).

C'est en 2009 que l'OCDE initie son programme sur la gouvernance de l'eau afin d'accompagner les gouvernements dans leurs réformes au travers d'analyses économiques, de dialogues, de politiques, de standards et de comparaisons internationales.

Ce travail part d'une triple affirmation : tout d'abord, la gestion de l'eau ne doit pas être appréhendée comme un enjeu sectoriel ou environnemental, mais comme un enjeu économique qui conditionne le développement des territoires et le bien-être des populations ; ensuite, les crises de l'eau sont souvent d'abord des crises de gouvernance (OCDE, 2015a), en ce sens qu'elles relèvent plus de lacunes dans l'élaboration et la mise en œuvre des politiques que du contenu même de ces politiques ; enfin, s'il ne peut y avoir de solution uniforme face à la diversité des cadres juridiques et institutionnels, des pratiques culturelles, ainsi que des conditions climatiques, géographiques et économiques, des principes communs peuvent néanmoins s'appliquer à différents contextes et territoires. Dès lors, la gouvernance devient essentielle pour organiser les règles politiques, institutionnelles et administratives, ainsi que les pratiques et les processus (formels et informels) au travers desquels les décisions sont prises et mises en œuvre, les parties prenantes peuvent exprimer leurs intérêts et voir leurs préoccupations prises en compte, et les décideurs rendent des comptes (OECD, 2015a).

Une gouvernance à la croisée de dynamiques exogènes aux politiques de l'eau

Le rôle de la gouvernance est d'autant plus fondamental pour intégrer les différents acteurs, domaines de politiques et territoires que d'importantes réformes (récentes ou en cours) exogènes au secteur de l'eau ont d'ores et déjà des répercussions dans le secteur. Quatre d'entre elles sont particulièrement saillantes : les réformes territoriales, qui rebattent les cartes de l'action publique dans de nombreux pays de l'OCDE ; l'expansion du numérique, qui favorise l'interconnexion des services publics, et donc la complémentarité des politiques ; la pression démocratique, qui reflète une crise de confiance et l'exigence d'une plus grande redevabilité des décideurs ; et, enfin, les contrecoups de la crise économique et les conséquences de celle-ci pour l'investissement public.

Les réformes territoriales ont des incidences fortes sur les cadres de gouvernance de l'eau. Elles cherchent souvent à répondre à des préoccupations d'équité et d'efficacité en reconsidérant les périmètres de l'action publique à différentes échelles pour rendre plus efficace le fonctionnement de la décentralisation et du principe de subsidiarité, et permettre des économies d'échelle. Ce faisant, elles ont des conséquences directes sur la gestion de l'eau, puisqu'il s'agit d'une compétence largement décentralisée, dans nombre de pays. En Italie, par exemple, la création des zones territoriales optimales en 1994 a permis de réduire le nombre des opérateurs de 8 000 à 115 seulement, au cours des quinze dernières années. Aux Pays-Bas, une réforme (avortée) visant à fusionner les 12 provinces en 5 régions était supposée englober les compétences des autorités régionales de l'eau nées au XIII^e siècle. Enfin, en France, les lois NOTRe (de nouvelle organisation territoriale de la République) et MAPTAM (de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation

des métropoles) réorganisent la gestion des milieux aquatiques, des inondations et des services d'eau et d'assainissement en s'appuyant sur les deux échelons que sont les métropoles et les régions, avec pour conséquence escomptée, le passage de 30 000 à 3 000 du nombre des autorités organisatrices, d'ici à 2025.

La numérisation croissante des services de l'eau est source d'horizontalité avec d'autres secteurs. Les interconnexions sont de plus en plus nombreuses avec les services météorologiques pour anticiper les catastrophes liées à l'eau et avec les directions d'urbanisme pour lutter contre les inondations en réquisitionnant les canalisations permettant de stocker le trop-plein d'eau. Les compteurs intelligents créent aussi de nouvelles externalités avec les assureurs. Le numérique se manifeste donc par un décloisonnement des services au profit de plus grandes synergies entre politiques publiques, et laisse entrevoir une gouvernance plus ouverte, dans laquelle le citoyen-consommateur est à la fois une cible et un acteur.

Redonner un rôle central aux citoyens dans les politiques de l'eau est une nécessité majeure pour les décideurs, dans un climat de crise dans la confiance placée par les administrés dans leurs gouvernants. Grâce aux technologies de communication, l'information est plus accessible à l'usager-citoyen et met en relief les carences, les échecs et les mauvaises pratiques. Les mobilisations citoyennes accentuent la pression démocratique, comme l'ont démontré les manifestations autour du projet de barrage de Sivens, en France, ou la fin de la gratuité de l'eau en Irlande. Cela exige de repenser la façon dont les politiques de l'eau sont élaborées et mises en œuvre, afin de leur assurer une meilleure acceptabilité sociale et politique.

Enfin, dans un contexte de récession économique, la question du renouvellement du patrimoine est posée dans de nombreux pays. En France, les besoins futurs en investissement sont colossaux : le patrimoine lié aux services publics d'eau potable et à l'assainissement est estimé entre 331 et 402 milliards d'euros (ERNST & YOUNG, 2012). Or, les sources de financement actuelles dans le secteur sont, et resteront, vraisemblablement, fortement contraintes : la consolidation fiscale réduit les budgets publics disponibles pour l'investissement dans les infrastructures, tandis que la baisse de la consommation d'eau par habitant, qui est de 1 % par an depuis 2000, en France (ONEMA, 2012), diminue les recettes des opérateurs de services, appelant les gouvernements à trouver des solutions innovantes pour financer et assurer la sécurité de l'eau. Certaines pistes d'action consistent à faire le meilleur usage possible des mécanismes de financement innovants, à prendre en considération des options à moindre coût (infrastructures vertes, etc.) et à engager un dialogue à long terme avec certains acteurs, tels que les promoteurs immobiliers ou les investisseurs institutionnels.

Ces évolutions ont été d'autant plus transformatrices qu'elles ont été accélérées par des bouleversements intervenus sur le plan international. Adoptés en septembre 2015, les dix-sept Objectifs de développement durable de l'ONU (ODD) inscrivent les politiques de l'eau dans une

vision universelle de l'Agenda 2030, avec un Objectif n°6 spécifique et de nombreuses autres cibles de progrès en matière de lutte contre la pauvreté, d'amélioration de la santé ou encore de développement des villes. Cette architecture donne à l'eau un rôle de « connecteur » dans la mise en œuvre des ODD qui appelle tous les pays – quel que soit leur niveau de revenus – à apporter des améliorations tangibles à la vie de leurs citoyens. Les systèmes de gouvernance seront essentiels pour faciliter la mise en œuvre de ces engagements en assurant les conditions cadres permettant de gérer l'eau de manière durable, intégrée et inclusive.

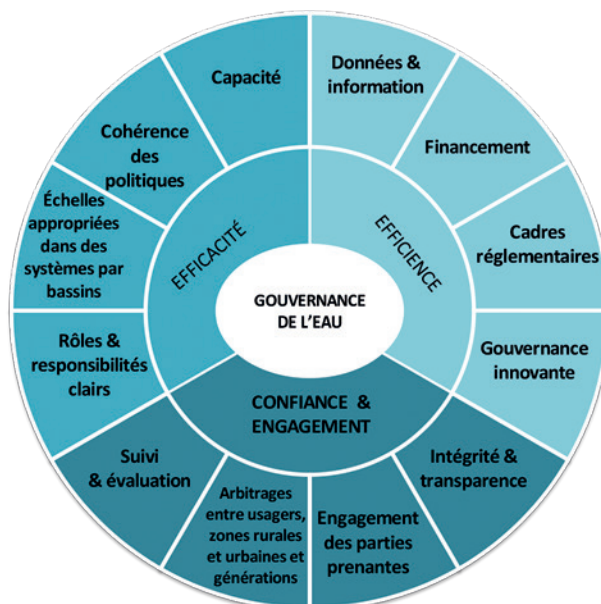
À cette avancée s'ajoute l'accord historique sur le climat conclu à Paris à l'issue de la COP 21, qui, au travers d'une journée dédiée, a permis d'interpeller les gouvernements et la communauté internationale sur l'importance de l'eau dans les politiques d'adaptation au changement climatique. Fin 2015, 92 % des contributions nationales (INDC - *Intended Nationally Determined Contributions*) incluaient l'eau dans leurs priorités d'action.

Enfin, des discussions sont en cours sur une révision possible de la directive cadre sur l'eau de l'Union européenne et de ses directives filles ⁽¹⁾ pour rendre leur mise en œuvre plus pragmatique et faciliter l'intégration de leurs objectifs dans d'autres politiques sectorielles de l'Union.

Les principes de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau

En raison de ses caractéristiques intrinsèques, la gestion de l'eau exige une gouvernance pluri-niveaux. Tout d'abord, bien souvent, les frontières hydrographiques et administratives ne coïncident pas, cela pose la question de l'échelle fonctionnelle de la gestion de l'eau dans le cadre de systèmes de bassin versant intégrés. De plus, l'eau douce est une préoccupation à la fois mondiale et locale impliquant un large éventail de parties prenantes des secteurs public, privé et non lucratif dans les processus décisionnels. L'eau est un secteur à forte intensité capitalistique et monopolistique, avec d'importantes défaillances de marché qui rendent la coordination et la régulation essentielles pour préserver l'intérêt général. La politique de l'eau est complexe et fortement corrélée à des domaines cruciaux pour le développement, tels que la lutte contre la pauvreté, la protection de l'environnement, l'agriculture, l'énergie, l'aménagement du territoire et le développement régional. Enfin, à des degrés divers, les pays ont alloué à des niveaux infranationaux des compétences de plus en plus complexes qui exigent des ressources considérables, ce qui génère des interdépendances et de forts risques de fragmentation tant territoriale qu'institutionnelle.

Depuis huit ans, l'OCDE analyse les déficits de gouvernance qui entravent la conception et la mise en œuvre des politiques de l'eau dans 17 pays de l'OCDE (2011) et dans 13 pays d'Amérique latine (2012b), tout en appuyant des processus de réforme de l'eau dans le cadre de dialogues nationaux entre politiques, au Mexique (2013), aux Pays-Bas (2014a), en Jordanie (2014b), en Tunisie (2014c), au



Les principes de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau (source : OCDE, 2015a).

Brésil (2015b) et en Corée (2017, à venir). Des analyses et des travaux thématiques ont aussi été développés sur l'engagement des parties prenantes, la gestion de l'eau dans les villes et la gouvernance des régulateurs de l'eau (2015d). Les retours d'expérience sur ces travaux ont permis de développer les principes de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau, qui ont été adoptés en juin 2015 par les 35 pays membres pour encourager des politiques de l'eau qui soient efficaces, efficientes et inclusives.

Les principes de l'OCDE se structurent autour de trois dimensions complémentaires de la gouvernance :

- **l'efficacité** réfère à la contribution de la gouvernance à la définition d'objectifs de politique de l'eau qui soient clairs et durables à différents niveaux de gouvernement, afin de les mettre en œuvre et de les atteindre. Il s'agit de clarifier l'attribution des rôles et des responsabilités, de gérer l'eau aux échelles appropriées, d'encourager la coordination intersectorielle et de mettre les capacités en adéquation avec la complexité des défis de l'eau à relever ;
- **l'efficience** se rapporte à la contribution de la gouvernance à la maximisation des bénéfices de la gestion durable de l'eau et du bien-être, et ce, au moindre coût pour la société. Cela repose sur le partage de l'information et des données, la mobilisation des financements, l'application des cadres réglementaires et la promotion de pratiques innovantes (collaborations inter-municipales, partenariats urbains-ruraux, etc.) ;
- **la confiance et l'engagement** font référence à la contribution de la gouvernance à l'instauration de la confiance publique et à l'inclusion des parties prenantes dans les

(1) Ces directives portent sur les eaux souterraines, les normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau, les inondations et les milieux marins.

décisions qui les concernent. Il s'agit de généraliser les pratiques d'intégrité et de transparence, de gérer les arbitrages entre les usagers, les régions et les générations, et d'assurer le suivi et l'évaluation des politiques de l'eau pour les adapter aux circonstances.

Depuis leur adoption par les pays membres de l'OCDE, 7 autres pays (Brésil, Chine, Colombie, Maroc, Pérou, Roumanie et Afrique du Sud) et plus de 150 acteurs se sont engagés à intégrer ces principes dans leurs politiques et leurs activités.

De l'utilité de disposer d'indicateurs sur la gouvernance de l'eau

La gouvernance de l'eau est un moyen pour parvenir à une fin, plutôt qu'une fin en soi. Il est dès lors fondamental de mesurer la performance des structures de gouvernance afin d'évaluer leur contribution à une meilleure gestion de l'eau à court, moyen et long termes. L'évaluation des cadres de gouvernance dans lesquels s'inscrivent les politiques de l'eau exige de développer des indicateurs consensuels, des outils indispensables à l'instauration d'un dialogue entre différents acteurs, sur une base factuelle, pour guider les processus décisionnels.

L'OCDE élabore actuellement un travail important visant le développement de ces indicateurs de gouvernance de l'eau qui permettront à toute partie prenante de déterminer non seulement si les conditions-cadres sont en place pour chacun des 12 principes, mais également de mesurer les progrès accomplis dans le temps, ainsi que l'impact des politiques en termes de résultats, notamment l'accroissement du bien-être des citoyens. Cette démarche n'est évidemment pas dénuée de difficultés liées aux multiples dimensions (institutionnelles, politiques, sociales, environnementales et économiques) de la gouvernance de l'eau et à la très grande diversité des arrangements institutionnels entre les pays et en leur sein. Enfin, les liens de causalité entre les politiques de l'eau et les résultats sont essentiels, mais ils sont délicats à établir. Les travaux en cours tiennent compte de ces écueils pour proposer un cadre pragmatique d'autoévaluation et faciliter le « *bench-learning* » qui permettra, à terme, de développer des politiques de l'eau plus efficaces permettant de meilleures conditions d'existence.

Bibliographie

ERNST & YOUNG (2012), *Étude de calcul de la récupération des coûts des services liés à l'utilisation de l'eau pour les bassins hydrographiques français en application de la directive cadre sur l'eau*, étude réalisée pour le compte de l'Office international de l'Eau, OCDE (2017, à paraître).

Enhancing Water Use Efficiency in Korea, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2015a), *Principes de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau* : <http://www.oecd.org/governance/oecd-principles-on-water-governance.htm>

OCDE (2015b), *Water Resources Governance in Brazil*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2015c), *Stakeholder Engagement for Inclusive Water Governance*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2014a), *Water Governance in the Netherlands Fit for the Future?*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2014b), *La Gouvernance des services de l'eau en Jordanie : surmonter les défis de la participation du secteur privé*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2014c), *La Gouvernance des services de l'eau en Tunisie : surmonter les défis de la participation du secteur privé*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2013), *Making Water Reform Happen in Mexico*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2012a), *Perspectives environnementales de l'OCDE à l'horizon 2050*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2012b), *Water Governance in Latin America and the Caribbean – A Multi-level Approach*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2011), *La Gouvernance de l'eau dans les pays de l'OCDE : une approche pluri-niveaux*, Éditions OCDE, Paris.

ONEMA (2012), *Observatoire des services publics d'eau et d'assainissement. Panorama des services et de leur performance*, Office national de l'eau et des milieux aquatiques, Paris.

WOODHOUSE & MULLER (2017), "Water Governance – An Historical Perspective on Current Debates", *World Development*, vol. 92, April, pp. 225-241.

Agences de l'eau : rétrospection prospective

Par Bernard BARRAQUÉ

Directeur de recherche émérite au CNRS (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement – CIRED)

et Patrick LAIGNEAU

Consultant indépendant

Dans le financement des agences de l'eau, il faudrait accepter un minimum de principe de subsidiarité pour se rapprocher d'une gestion en bien commun : selon leurs principes fondateurs, ces agences ne sont ni des établissements publics de l'État prélevant des impôts ni des facilitateurs des « marchés de l'eau » (que l'on peine à faire fonctionner même aux États-Unis, en raison des coûts de transaction). Ce sont des établissements publics au service de leurs usagers réunis ès-qualités pour protéger l'environnement de la façon la plus efficace possible en se mettant d'accord, à l'instar de leur modèle de départ, dans la Ruhr.

Une interview d'Ivan Chéret réalisée il y a trois ans⁽¹⁾, la mobilisation de quelques données réunies en Europe et aux États-Unis sur la gestion territoriale de l'eau⁽²⁾, et la thèse de Patrick Laigneau sur l'histoire des agences de l'eau françaises⁽³⁾, permettent ensemble de mieux analyser l'imbroglio dans lequel celles-ci se sont développées, et d'en proposer une évolution ambitieuse en profitant de la reconnaissance récente de la gestion « en bien commun » dans notre pays.

Dans cet article, nous présentons le modèle initial des agences de l'eau de la Ruhr, découvert par Chéret comme étant bien différent du principe pollueur-payeur tel que défini par l'économie néoclassique. Après avoir confronté ces deux modèles dans les trois dimensions, que sont l'économie institutionnelle, le droit fiscal et la forme de la démocratie, nous montrerons que les forces politiques et la haute administration ont *volens nolens* maintenu les agences de l'eau françaises entre les deux. Aujourd'hui, ces agences sont essentiellement financées par le biais des factures d'eau des usagers domestiques, mais l'État ponctionne leur budget au nom de l'austérité et oriente leur action vers de nouveaux domaines (comme la lutte contre les inondations ou la préservation de la biodiversité), qui n'ont que peu de chose à voir avec les services publics de l'eau. Pour sortir de la crise, il faudrait traduire l'approche des biens communs qu'ont développée Elinor Ostrom et d'autres économistes institutionnalistes dans les trois dimensions précitées, ce qui ne peut être fait sans modifier au préalable la Constitution.

La Ruhr, il y a cent ans

À la fin du XIX^e siècle, l'explosion industrielle consécutive à l'expansion de l'Allemagne a fait de la Ruhr une grande

zone industrielle connaissant de graves problèmes de pollution, notamment du fait de la subsidence des sols suite à l'activité minière : les eaux polluées ne s'évacuaient plus. Les industriels du charbon et de l'acier se sont associés avec les villes, ainsi qu'avec d'autres industriels dépendant de la force motrice des rivières, pour stocker l'eau à potabiliser et évacuer les eaux usées. Ils ont obtenu du gouvernement impérial la transformation d'associations à adhésion volontaire en des institutions à adhésion obligatoire, les contributions volontaires devenant des redevances permettant de financer les investissements collectifs, tous réalisés par les fameuses *Genossenschaften*, qui sont des syndicats coopératifs de bassin. Certaines d'entre elles ont construit et géré les stations d'épuration et les principaux collecteurs d'égout, d'autres ont aménagé des barrages réservoirs pour réguler les quantités d'eau propre nécessaires, et d'autres encore ont fait les deux. Au nombre de 11 aujourd'hui, elles offrent une illustration pratique de ce que représente le principe de subsidiarité en Allemagne : nécessaires dans la *Ruhrgebiet*, elles n'existent que dans cette région ; partout ailleurs

(1) Interviewé d'abord par Hélène Vacher pour la première partie de sa carrière au Sénégal, Ivan Chéret a raconté à Bernard Barraqué la naissance et le développement initial des agences de l'eau ; les interviews ont été transcrites et sont consultables auprès du comité d'histoire du ministère de l'Écologie.

(2) Voir, notamment, le livre de Kneese et Bower de 1968, qui n'est pas traduit en français, mais qui contient deux pages sur les agences de l'eau relatant un échange des auteurs avec H. Lévy-Lambert.

(3) LAIGNEAU P., *Tristes eaux françaises, tome I – Regarder l'histoire des agences et comités de bassin en France depuis les tropiques, thèse réalisée sous la cotutelle de l'Université fédérale du Rio Grande do Sul et d'AgroParistech*, 2014.

Photo © Ian Hanning/REA



Un site de stockage de boues rouges.

« Dans le modèle économique du “principal-agent”, l’État fait payer à l’agent une taxe qui représente le coût social de l’externalité et dont le montant doit s’élever jusqu’à inciter l’agent à réduire ses rejets polluants à un niveau acceptable pour la société. »

dans le pays, la gestion de l’eau est restée municipale ou étatique. Elles sont dirigées par des comités d’usagers représentés ès-qualités, donc selon un principe de démocratie participative : les élus des villes et les représentants des arrondissements ruraux y côtoient des industriels relevant de diverses branches, et, aujourd’hui, y siègent également des représentants d’ONG environnementales, de consommateurs, etc. On a donc affaire à une gestion en bien commun à une échelle régionale, à la différence des institutions plus locales et plus directes étudiées par Elinor Ostrom (les usagers domestiques n’y étant pas représentés directement). Et c’est ce modèle qu’Ivan Chéret (initiateur de la loi sur l’eau de 1964) a proposé d’importer en France. Accompagné d’un groupe de sénateurs, c’est à Essen qu’il a compris l’intérêt d’investir de façon mutualisée dans des ouvrages de régulation des volumes d’eau et de dépollution des eaux usées.

La conception néoclassique du principe pollueur-payeur

Le principe pollueur-payeur (PPP) a été popularisé dans les années 1970 par l’OCDE, après le démarrage des agences de l’eau et surtout très longtemps après celui des syndicats coopératifs allemands. Entre-temps, une

idée différente avait vu le jour, celle de l’internalisation des externalités qui était inscrite dans le modèle économique du « principal-agent » : pour résumer, l’État fait payer à l’agent une taxe qui représente le coût social de l’externalité et dont le montant doit s’élever jusqu’à inciter l’agent à réduire ses rejets polluants à un niveau acceptable pour la société. Dans cette conception, l’argent n’est pas rendu aux pollueurs ayant fait un effort : c’est la taxe qui est incitative. D’ailleurs, les économistes de l’environnement considèrent souvent que si les taxes étaient affectées à un fonds de dépollution, les subventions issues de ce fonds aboutiraient logiquement à surinvestir dans des réductions de pollution en sortie d’usine, au lieu de pousser les pollueurs à réduire leur production ou à changer de procédé. Ils n’envisagent guère que les taxes soient dirigées vers une institution subsidiaire chargée de faire des investissements publics à la place des pollueurs, comme c’est le cas dans la Ruhr⁽⁴⁾.

(4) Cette critique des agences de l’eau est faite par GODARD O. (2016), Environnement et Développement durable, une approche méta-économique, Louvain la N., De Boeck, 494 p. (voir pp. 293 sqq.).

À l'inverse, d'autres ont reproché à cette conception du PPP une asymétrie d'information qui est favorable à l'agent, celui-ci connaissant bien mieux son procédé et les coûts de dépollution que le principal. Imposer une redevance au bon niveau n'est pas chose facile.

L'application du principe pollueur-payeur dans le modèle principal-agent a généralement été associée à l'économiste Alfred Pigou. D'autres économistes ont invoqué la réponse de Ronald Coase à Pigou : les pollueurs ou les utilisateurs d'une même ressource n'ont pas besoin d'une intervention de l'État s'ils sont capables de s'asseoir autour d'une table et de comparer la valeur marginale de la ressource dans l'activité de chacun, puis, quelle que soit la règle initiale de répartition de cette ressource entre eux, de transférer des droits jusqu'à aboutir à un équilibre des valeurs marginales. Établir la connaissance nécessaire à l'échange, cela a un coût, que l'on appelle « coût de transaction ». Coase reconnaît que si les acteurs sont nombreux, le calcul devient très difficile à faire. Mais, de toute façon, le fait de réunir les pollueurs entre eux constitue un pas essentiel vers la construction d'une confiance collective qui réduit, de fait, ce coût de transaction. D'où l'intérêt d'institutions comme les comités de bassin et de redevances que tous paient, mais qui peuvent être soit utilisées par l'institution de façon mutualisée, soit rendues en priorité à ceux dont les investissements présentent le meilleur rapport coût/avantage.

Deux modèles de gestion économique et politique pour les agences de l'eau

À ce que nous avons présenté jusqu'ici, il faut ajouter une dimension importante, celle du droit fiscal. Beaucoup de pays distinguent en effet les redevances payées à un établissement public, en contrepartie d'un service rendu, des taxes payées à un État, qui les utilise arbitrairement dans son budget général. En France, cette distinction est d'autant plus importante que les impôts font l'objet d'un contrôle annuel du Parlement en vertu de l'article 34 de la Constitution (« l'argent public est prélevé et dépensé sous le contrôle des élus de la nation »). Une redevance pour service rendu est, quant à elle, seulement soumise à un contrôle des ministères de tutelle concernés et elle peut être administrée par des institutions comprenant des représentants non élus. La distinction, en matière de parafiscalité, entre redevances et impositions de toutes natures a été clairement établie par le Premier ministre Michel Debré au début de la V^e République, dans le cadre d'une ordonnance annexée à la loi de finances de 1959.

On peut synthétiser cette analyse par une triple opposition entre deux conceptions idéal-typiques (étatique-libérale à gauche et communautaire-subsidaire à droite) des agences de l'eau et de leurs redevances.

Nous faisons l'hypothèse que la colonne de gauche du Tableau 1 ci-contre correspond à une conception libérale de l'action publique d'incitation économique, avec une mise en tension de l'État et du marché ; elle peut être conduite soit par une institution de bassin, soit (et c'est plus souvent le cas) directement par une institution administrative classique, notamment l'État, qui intervient pour

Dimension	Coalition libérale-étatique (marchés + État)	Coalition de gouvernance communautaire et subsidiaire
Économie institutionnelle	Pollueur-payeur dans le modèle principal-agent : Redevance = incitation du pollueur à réduire son externalité (Pigou).	Pollueur-payeur, avec arrangement de type « coaséen » : Redevance = financement mutualisé d'investissements.
Droit fiscal	Redevance = impôt perçu par un EPA et alimentant le budget général de l'État (elle n'est pas rendue aux pollueurs).	Redevance = contrepartie d'un service rendu par un EPIC (budget affecté et utilisé de façon mutualisée).
Politique publique	Démocratie représentative : argent public collecté et dépensé sous le contrôle des élus de la nation.	Démocratie participative : budget mutualisé et dépensé sous le contrôle d'un comité composé de représentants des usagers.

Tableau 1 : La triple opposition entre deux conceptions idéal-typiques (étatique-libérale et communautaire-subsidaire) des agences de l'eau et de leurs redevances.

corriger la défaillance du marché. La colonne de droite du Tableau 1 ci-dessus correspond plutôt aux anciennes communautés d'irrigants, aux *Wateringues* néerlandaises, et, surtout, aux syndicats coopératifs de la Ruhr, dans une tradition de gestion en bien commun remontant au Moyen Âge, mais modernisée à des échelles plus régionales.

En sollicitant la mémoire d'Ivan Chéret, nous avons cherché à savoir si ces deux conceptions avaient été discutées à l'époque où il animait le Secrétariat permanent pour l'étude des problèmes d'eau (SPEPE). Lui-même avait passé six mois au *Bureau of Reclamation* à Denver (Colorado) en 1947, à sa sortie de l'École des Ponts-et-Chaussées. Il avait ainsi connu diverses expériences d'investissements publics dans des travaux hydrauliques relevant de l'aménagement du territoire. Au moment de concevoir les agences de l'eau en France, il avait devant les yeux les Sociétés d'aménagement régionales dans le domaine de l'eau qui avaient été créées par l'État pour réaliser de grands travaux hydrauliques et des ouvrages multifonctions à une époque où l'on n'imaginait pas encore la possibilité d'une gestion intégrée et participative : Société du Canal de Provence (SCP), Compagnie nationale d'aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc (BRL), Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG). Et, d'ailleurs, la Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale (Datar), qui portait la régionalisation et les agences, était encore très tournée vers l'aménagement du territoire et les grands travaux. Mais Chéret avait découvert les expériences menées dans la Ruhr, lesquelles étaient portées *a contrario* par les acteurs des bassins versants concernés.

En revanche, Hubert Lévy-Lambert, un ingénieur du corps des Mines, qui était plus jeune d'environ dix ans, n'avait donc pas connu les problèmes économiques et sociaux rencontrés par Chéret dans le cadre de l'aménagement des Colonies (notamment dans la vallée du fleuve Sénégal). S'il était lui aussi en contact avec les États-Unis, c'était plutôt avec des économistes de l'environnement, en particulier Allen V. Kneese⁽⁵⁾, et donc, lorsqu'il codirigea avec Chéret la Commission de l'eau au Plan, entre 1962

(5) Voir sa biographie via le lien : <http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-Resources-143-appreciation.pdf>

et 1966, il se référait plutôt à des concepts pigouviens, tels que l'internalisation des externalités, ce qui pourrait renvoyer au premier modèle idéal-typique des agences de l'eau.

Mais, en réalité, opposer entre eux ces deux inventeurs des agences de l'eau serait tout à fait anachronique, car la discussion plus théorique que nous pouvons présenter aujourd'hui n'était pas possible à cette époque d'aménagement du territoire et de grands travaux hydrauliques : Chéret apportait le territoire de bassin versant, Lévy-Lambert l'incitation économique, mais tous les deux voulaient des agences de bassin qui soient autonomes (c'est-à-dire financées par les usagers de l'eau) et qui construisent les ouvrages nécessaires à l'exécution de leurs missions. Et, comme l'a rapporté Allen V. Kneese (1968), ils pensaient que ces agences devaient disposer de la maîtrise d'ouvrage, à l'instar des *Genossenschaften* de la Ruhr. Mais comme ils voulaient que le dispositif couvre l'ensemble du territoire, il fallait bien imposer un modèle, là où – aux Pays-Bas et dans la Ruhr – les institutions de l'eau étaient bien davantage le fruit de volontés coopératives locales (une échelle qui serait celle des SAGE⁽⁶⁾ aujourd'hui chez nous). Et, de fait, la création des agences par la Datar est essentiellement l'aboutissement de discussions au niveau national entre les parlementaires, d'une part, et entre les différents corps d'ingénieurs, de l'autre. Pourtant, au fil des années, la Datar a évolué vers une conception davantage contractuelle et moins aménagiste de l'action de l'État, ne serait-ce que pour remettre en cause la tradition de la « régulation croisée », en vertu de laquelle les élus locaux négociaient leur allégeance à la modernisation de l'économie contre des subventions d'État, en particulier dans le domaine des infrastructures (GRÉMION, 1976). À cette époque, la réforme régionale a échoué, mais les agences ont quand même pu se développer, non sans une certaine ambiguïté quant à leur rôle.

Un imbroglio juridique

Lors de la discussion parlementaire de la loi sur l'eau de 1964, les redevances ont été présentées par le ministre de l'Équipement, Marc Jacquet, comme des « paiements pour services rendus ou pour fournitures faites ». Cette conception, portée par des sénateurs modérés (comme Maurice Lalloy), permettait de garantir que l'argent recueilli resterait dans les agences et serait disponible pour aider les acteurs voulant investir pour un meilleur environnement. Elle fut acceptée par les socialistes emmenés par le sénateur Le Bellegou, et bien sûr par la droite qui était fidèle au gouvernement. Seuls les communistes resteront hostiles au principe du paiement de la gestion de l'eau par les usagers.

Si les redevances des agences de l'eau avaient été qualifiées d'impositions (l'alternative de parafiscalité offerte par l'Ordonnance de 1959), il aurait alors fallu soumettre le budget des agences au contrôle annuel du Parlement, ce qui ne correspondait ni à leur caractère quinquennal ni à la détermination de leur montant par les comités de bassin. Les fondateurs des agences n'ont pas envisagé, à l'époque, de prendre cette voie : la soumission au prin-

cipe de l'annualité budgétaire aurait été dangereuse pour la pérennité d'un système devant financer des infrastructures lourdes et des travaux souvent de longue durée. De leur côté, les élus ne souhaitaient pas voter une augmentation des impôts.

Pourtant, afin qu'elles soient mieux contrôlées par le Trésor public, les agences ont été créées sous la forme d'établissements publics à caractère administratif (EPA), et non sous celle d'établissements publics à caractère industriel et commercial (EPIC). Résultat, certains ont voulu que la question du statut juridique des redevances des agences soit soumise à l'avis du Conseil d'État. Mais, en 1967, ce dernier fut d'avis que l'on ne pouvait pas décider ! Le fait que tous devaient les payer faisait des redevances un impôt, sauf pour ceux qui recevaient une aide, et pour lesquels elles passaient dans la catégorie des redevances pour service rendu. Le Conseil d'État proposa donc de laisser les redevances dans une catégorie à part, une catégorie *sui generis*.

Avec le recul, c'est tout à fait passionnant, car on peut faire l'hypothèse que cette troisième voie de la parafiscalité correspondait à la gestion en bien commun. En particulier, si l'on avait laissé des possibilités de maîtrise d'ouvrage aux agences, celles-ci seraient allées jusqu'au bout de la logique de mutualisation, rendant service à l'ensemble des usagers de l'eau du bassin (ou de sous-bassins), comme c'est le cas dans la Ruhr. Mais elles n'auraient dû réaliser que des « travaux d'intérêt commun », comme la construction de stations d'épuration ou de barrages réservoirs multifonctions ; il était donc exclu pour elles de réaliser des travaux d'intérêt collectif (comme des réseaux d'égout, ceux-ci étant gérés, logiquement, sous l'autorité des élus locaux), pas plus que des travaux d'intérêt privé (comme l'installation de fosses septiques⁽⁷⁾).

Sur le terrain, la création des agences rencontrait de nombreuses oppositions : les industriels étaient tentés par le chantage à l'emploi ; les élus locaux s'opposaient au paiement, par leurs municipalités, de redevances à des institutions non élues, et donc moins souveraines ; leurs représentants au sein de l'Association des maires de France (AMF) considéraient que sa base de calcul, l'équivalent-habitant, faisait de la redevance une taxe de capitation, ce qui rappelait fâcheusement l'Ancien Régime ! Quant aux ingénieurs territoriaux de l'État, ils ne voulaient pas que les travaux dont ils assuraient la maîtrise d'ouvrage pour le compte des collectivités locales leur soient enlevés au profit des agences.

Les industriels ont pu être apaisés grâce à la mise en place des contrats de branche, entre 1970 et 1977, par lesquels l'État ajoutait de nouvelles aides et phasait la modernisation des usines en concertation directe avec chaque branche (LASCOURMES, 1995). Les élus, pour leur part, étaient partagés : d'un côté, ils devaient payer les

(6) Schémas d'aménagement et de gestion des eaux, créés par la loi de 1992. Voir infra.

(7) Déclaration de J.-Cl. Suzanne, deuxième directeur de l'Agence Rhin-Meuse, lors de l'évaluation du dispositif des agences de l'eau (CGP, 1997).

redevances à partir de leur budget et, de l'autre, ils pouvaient être aidés s'ils investissaient dans la dépollution. Face à l'avis du Conseil d'État, ils ont finalement trouvé un nouvel argument : ce n'était pas les collectivités qui polluaient, mais leurs habitants ; on devait donc prélever les redevances directement sur les factures d'eau. Or, dans la partition de la parafiscalité, cela revenait à choisir vraiment la voie du service rendu, ce qui est la caractéristique des services publics d'eau.

Ce changement avait été rendu possible par un décret pris en Conseil d'État, à l'automne 1967 : le coût de l'assainissement jusqu'alors payé avec les impôts locaux, a été intégré dans les factures d'eau, en considérant que les habitants raccordés à un réseau d'égout étaient de fait débarrassés de leurs eaux usées, ce qui constituait un service rendu. Y rajouter la redevance pollution était donc logique. Et, pour compléter le tableau, les habitants non raccordés à un réseau passant devant chez eux devaient quand même payer la redevance – celle-ci s'assimilant à une taxe punitive – tandis que ceux qui n'avaient pas de réseau d'égout passant devant chez eux ne payaient rien...

C'est ainsi qu'est apparu le terme somme toute mystérieux de contre-valeur : à partir de 1974, les redevances ont été payées par les habitants *via* leurs factures d'eau, mais ces derniers n'étaient qu'indirectement représentés dans les comités de bassin ; ce sont leurs élus qui siégeaient et votaient le montant desdites redevances. Or, c'est à ces derniers, en tant qu'autorités responsables des services publics considérés, qu'ont été attribuées les aides et primes destinées à financer des travaux d'épuration. C'est ce changement qui est véritablement à l'origine du fait qu'à la fin des années 1990, les usagers domestiques payaient plus des 4/5 du total : les industriels, une fois les investissements réalisés, préféraient recevoir des primes d'« épuration », et donc payer moins et recevoir moins d'aides ; les agriculteurs ne payaient presque rien et recevaient tout de même « trois fois rien » ; *a contrario*, les élus préféraient continuer à recevoir des subventions à l'investissement, ce qui conduisait à laisser les habitants payer les redevances au plafond. Pour faire bonne mesure, on a complexifié le dispositif en introduisant un coefficient d'agglomération pour augmenter le montant des redevances dans les plus grandes villes où les travaux d'assainissement coûtaient plus cher.

À partir de 1982, l'épée de Damoclès !

Arrivée au pouvoir en mai 1981, la gauche connaissait peu la gestion des agences, ayant été longtemps dans l'opposition. Elle trouvait que les comités de bassin étaient dominés par des conservateurs (élus de petites villes, industriels...). Pour les rééquilibrer politiquement, le gouvernement Mauroy voulut profiter du nouveau statut des Conseils régionaux (désormais élus au suffrage universel) pour faire en sorte que ceux-ci soient représentés dans les comités de bassin. Il voulait en faire de même pour les syndicats ouvriers. Mais comment faire ? On a alors demandé au Conseil constitutionnel si un décret serait un texte de niveau suffisant ou s'il faudrait une loi. Et la réponse donnée, en juin 1982, a surpris tout le monde : il

fallait une loi, et, dans ces conditions, la première chose à faire, pour les Assemblées, serait de requalifier dans cette loi les redevances en impositions, puisqu'à son avis, il n'y avait pas service rendu ! Ce faisant, le Conseil constitutionnel faisait un cadeau royal au ministère des Finances, qui n'avait jamais accepté l'autonomie budgétaire dont bénéficiaient les agences de l'eau, et qui réclamait que l'on soumette leur budget à l'article 34 de la Constitution, et donc à un contrôle parlementaire annuel.

Mais prenant conscience de cette bévue, le monde de l'eau décida de faire le gros dos et de ne pas participer à la rédaction de cette loi. Pire encore, en décembre 1982, fut créé un nouvel *item* de redevance, le coefficient de collecte. Il s'agissait de faire payer plus de redevances aux villes ayant besoin d'achever leur réseaux d'égout. Certes, cette mesure était devenue nécessaire, puisque le ministère de l'Intérieur avait complètement tari ses subventions à l'assainissement collectif au cours du septennat précédent. Mais cela revenait à pousser encore davantage la logique du service rendu pourtant invalidée par le Conseil constitutionnel.

La discussion sur la nature des redevances s'est bien évidemment réactivée à chaque projet de modernisation du système, notamment à la fin des années 1980. L'Acte unique européen de 1986 ayant donné compétence à la Commission européenne en matière d'environnement, celle-ci décida de renforcer la politique de l'eau à travers l'adoption de trois directives : sur les eaux usées urbaines (91/271/CE), sur les nitrates agricoles (91/676/CE) et sur la qualité écologique des cours d'eau. La troisième n'est jamais sortie, victime de désaccords entre les États membres, mais elle a abouti plus tard sous la forme de la directive cadre sur l'eau (DCE, 2000/60/UE). La France, alors dirigée par Michel Rocard (en tant que Premier ministre), avec Brice Lalonde, son ministre de l'Environnement, décida de relancer sa politique de l'eau au travers, d'une part, de la mise en place des SDAGE et des SAGE et, d'autre part, d'un triplement progressif du montant des redevances pour pouvoir appliquer la première des trois directives précitées, la directive sur les eaux résiduaires urbaines (DERU). Mais surtout, par la loi de 1992, elle a pris ses distances avec la tradition de droit romain qui prévalait dans le domaine de l'eau : en redéfinissant cette dernière comme un « patrimoine commun de la nation », elle a choisi une expression qu'il faut traduire en clair par « bien commun », dont l'État ne serait plus le maître, mais seulement le gardien, devant, à ce titre, veiller à ce qu'un usage raisonnable en soit fait, en dissociant le droit d'usage du droit de propriété (pour les eaux souterraines). Mais ce qui a été réalisé dans la pratique ne s'est pas appuyé sur une quelconque théorie, car, à l'époque, Elinor Ostrom était une parfaite inconnue en France (sauf pour quelques initiés, comme l'économiste et anthropologue Jacques Weber). Son livre sur la gouvernance des communs n'a été publié qu'en 1990 et n'a été traduit en français qu'en 2010. D'ailleurs, la loi de 1992 a prudemment esquivé la question posée par le Conseil constitutionnel, et, nulle part, on n'y parle des agences. Le doublement de leurs budgets, nécessaire pour pouvoir répondre aux

enjeux des nouvelles directives européennes, s'est fait par l'augmentation des redevances existantes.

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) – ou la fin du principe « l'eau paie l'eau » ?

Cela n'est pas sans importance, car, en définitive, les conceptions de la gestion de l'eau en France restaient fondamentalement inscrites dans l'antagonisme classique entre État et Marché. Une preuve manifeste en a été apportée lors du retour surprise de la gauche au pouvoir en 1997 avec le gouvernement de cohabitation de Lionel Jospin : paradoxalement, sa ministre de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Mme Dominique Voynet, qui en tant qu'écologiste aurait dû soutenir les approches communautaires et subsidiaires de l'eau, fut invitée à mettre en œuvre une taxe générale sur les activités polluantes, et à y inclure les redevances des agences ! Cela voulait dire que les redevances seraient reversées dans le budget général – au ministère des Finances, lequel serait libre d'en rendre la part qu'il voudrait bien.

C'est dans ce contexte que divers rapports d'évaluation de la politique française de l'eau, dont celui du Conseil général du Plan (CGP), ont été transmis à une presse complaisante vis-à-vis d'un discours à la mode chez certains économistes, élus et associations de consommateurs, celui dénonçant la faillite des agences de l'eau, ainsi qu'une dérive du principe pollueur-payeur vers un principe pollueur-sociétaire (comme si le modèle initial de la Ruhr n'était pas justement un modèle mutualiste et coaséen d'avant la popularisation du principe pollueur-payeur dans sa version pigouvienne – voir le Tableau de la page 114). Le plus incroyable est que cela se produisait sous un gouvernement de gauche, ce qui conduisit le syndicat national de l'environnement (SNE), encore affilié à l'époque à la CFDT, à dénoncer... la ministre de l'Environnement⁽⁸⁾ !

La multiplication des mises en garde a permis de sauver les redevances d'une annexion dans la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP), mais elle n'a pas pu éviter la légitimation de l'idée selon laquelle les redevances des agences de l'eau devaient être votées par le Parlement. Et, malheureusement, la Commission européenne en a déduit que les aides versées par ces agences étaient des aides d'État qui devaient être soumises aux contraintes de plafonnement au nom de l'égalité des acteurs économiques des pays membres de l'Union devant la concurrence. Une petite enquête réalisée chez les pays voisins aboutit à constater que la France fait exception : dans la Ruhr, les redevances payées ne sont rendues ni aux industriels ni aux villes, car ce sont les *Genossenschaften* qui font les investissements à leur place ; et, de plus, selon leur interprétation du principe de subsidiarité, ce ne sont pas des établissements relevant de l'État, ni même du *Land*, mais des institutions qui sont la propriété de leurs usagers... C'était aussi le cas en France, dans le projet initial de Chéret et du Sénateur Lalloy, mais nos élus et notre administration prétendent ne pas pouvoir accepter que le principe de subsidiarité puisse s'appliquer à ce qu'ils considèrent comme des impôts.

On en vient logiquement au contenu de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA), qui, en fait, avait été préparée sous le gouvernement de gauche plurielle, mais n'avait pas pu être votée avant la défaite de cette coalition, en 2002. Après avoir à plusieurs reprises⁽⁹⁾ tenu (ou entendu) des discours sur la nécessité de protéger le budget des agences d'une intégration dans le budget de l'État *via* le vote annuel des lois de finances par le Parlement, notamment en mobilisant la charte de l'environnement⁽¹⁰⁾, les élus de la nation, se sont finalement rangés à l'avis du Conseil constitutionnel de 1982, en décidant de voter les redevances, chaque année. Cela a permis de remplacer les redevances pour « pollution » et pour « prélèvement-consommation », par un ensemble, plus complexe, de 8 redevances, ce qui *a priori* n'allait guère dans le sens d'une réduction de l'opacité qui était reprochée au précédent système. Les députés se sont certes engagés à ne pas toucher au budget quinquennal du programme en cours, mais le gouvernement élu en 2012 ne s'est nullement senti engagé par ces promesses, et ce qui devait arriver arriva : le ministère des Finances décida un prélèvement de 10 % sur le produit des redevances au nom de la maîtrise des dépenses de l'État. Et le fonctionnement de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema), transformé en Agence française de la biodiversité par la loi du même nom, est lui aussi assuré par un prélèvement sur le budget des agences. Quant à la prévention des inondations, là encore, après avoir affirmé durant des décennies que les agences ne pouvaient pas la financer, puisqu'elles ne percevaient pas les redevances correspondantes sur les faits générateurs de débordements, on va bien finir par leur demander d'intervenir *via* la mise en œuvre de la gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (Gemapi), le fonds Barnier étant tout à fait insuffisant pour couvrir les besoins des Programmes d'action de prévention des inondations (Papi). Mais, si nous ne nous abusons pas, dans les factures d'eau, les usagers domestiques ne sont pas censés payer pour la pluie !...

Une incohérence corrigible ?

En conclusion, il faut revenir à la question qui se posait déjà dans les années 1960 : les redevances des agences sont-elles la contrepartie d'un service rendu ? C'est le choix qui avait été fait au départ, en épousant la logique économique qui gouverne les services publics à caractère industriel et commercial, et malgré le fait que les agences aient été créées sous la forme d'EPA⁽¹¹⁾. En Allemagne, les redevances pollution (*Abwasserabgaben*) sont payées par

(8) Voir LAIGNEAU P. (2014), ainsi que le tome II de son livre sur le Syndicat national de l'environnement, à paraître en creative commons et édité par le syndicat SNE-FSU.

(9) Voir, en particulier, le discours très clair du rapporteur B. Sido au Sénat en 2005 : <http://www.senat.fr/seances/s200504/s20050405/s20050405001.html#section26>

(10) Adoptée en 2004 et insérée dans la Constitution lors de sa modification en 2005.

(11) Avec d'ailleurs, pour conséquence, que les dépenses des agences sont contrôlées a priori par un contrôleur financier, alors que pour les EPIC, le contrôle est réalisé a posteriori.

les villes aux *Länder*, libre à elles de les répercuter ensuite sur les consommateurs ou sur les citoyens, et d'assumer leur décision.

Pour sortir de l'imbroglie actuel, nous suggérons de repartir de l'avis du Conseil d'État de 1967 préconisant la création d'une catégorie à part pour la parafiscalité de l'eau (et, potentiellement, pour toutes les ressources naturelles renouvelables)⁽¹²⁾ ; et cette création prendrait un nouveau sens, celui de la catégorie de « gestion des biens communs », qui a été légitimée par divers travaux d'économie institutionnelle, lesquels appellent à la création d'institutions appropriées, comme le sont justement les comités de bassin, les Commissions locales de l'eau (CLE), les comités de contrats de rivière, etc.

Donc, il faut simplement remettre en cause la partition de la parafiscalité telle qu'opérée par Michel Debré, en 1959 : pourquoi n'y aurait-il que deux catégories, à savoir la redevance pour service rendu, qui renvoie à l'économie de marché, et l'impôt, qui est l'apanage du ministère des Finances et du Parlement ? La solution serait évidemment de modifier (enfin !) l'article 34 de la Constitution, pour laisser, par exception au régime général, la fixation de la parafiscalité des ressources naturelles à des instances dites communautaires et subsidiaires, par exemple, les comités de bassin. Tout en conservant, bien sûr, la tutelle de l'État démocratique qui est le nôtre sur ces instances.

Mais modifier l'article 34, simplement pour « une histoire de parafiscalité », nous dit-on souvent du côté des élus, « ce n'est pas possible », « c'est ridicule », « on a autre chose à faire », etc. Nous leur répondons, sereinement, que si la nouvelle mode est de tenir un discours selon lequel l'eau serait un bien commun, il faudrait alors juste comprendre que son application nécessite l'adoption d'un dispositif institutionnel approprié. Il s'agit là de quelque chose de très important, voire d'essentiel, si l'on veut pouvoir répondre aux enjeux de la modernisation des politiques environnementales.

Bibliographie

CGP (Commissariat général au Plan) (1997), *Évaluation du dispositif des agences de l'eau*, Paris, La Documentation Française.

GODARD O. (2016), *Environnement et Développement durable, une approche méta-économique*, Louvain-la-Neuve, De Boeck, 494 p. (voir pp. 293 sqq.).

GRÉMION P. (1976), *Le Pouvoir périphérique, bureaucrates et notables dans le système politique français*, Paris, Le Seuil.

KNEESE A. V. & BOWER B. T. (1968), *Managing Water Quality, Economics Technology Institutions*, Johns Hopkins Press.

LAIGNEAU P. (2014), *Tristes eaux françaises*, Tome I – *Regarder l'histoire des agences et comités de bassin en France depuis les tropiques*, thèse réalisée sous la cotutelle de l'Université fédérale du Rio Grande do Sul et d'AgroParistech.

LASCOURMES P. (1995), *L'Écopouvoir, environnement et politiques*, Paris, La Découverte.

OSTROM E. (1990), *Governing the Commons, The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge University Press.

(12) Lors d'une présentation du rapport du Conseil d'État, « L'eau et son droit », au Cercle français de l'eau, il a été demandé au rapporteur Tiberghien, pourquoi le Conseil d'État n'avait pas réaffirmé son ancien avis. Il a répondu que la juridiction à laquelle il appartenait devait se plier aux décisions du Conseil constitutionnel. On doit en conclure qu'il faut modifier la Constitution. Comme dit le sage chinois : « Si tu n'aimes pas qu'une règle te tape sur la tête, déplace la règle... »

The digital and environmental transitions

Foreword

Laurence Monnoyer-Smith, general commissioner of Sustainable Development, interministerial delegate to Sustainable Development

Introduction

Hélène Serveille and **Richard Lavergne**, engineers from the Corps des Mines, Conseil général de l'Économie (CGE)

1- Digital and environmental, two domains in transition

How to make the digital and environmental transitions converge?

Damien Demailly, Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI); **Renaud Francou**, Fondation Internet Nouvelle Génération (FING), **Daniel Kaplan**, Fondation Internet Nouvelle Génération (FING), and **Mathieu Saujot**, Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI)

The environmental transition sets an inevitable time frame for our societies while the digital transition is the driving force of our times. The environmental transition has a clear goal but is straining to find a way, while the digital transition is affecting everyday life and impelling change but without any clear collective goal. The one has a goal to reach; the other, a way to go. They need each other! However the agents in these two domains usually move in separate spheres without fully realizing the power for transformation that their convergence would bring. How to make these two major contemporary transitions converge?

How are the digital and environmental transitions interconnected?

Patrice Geoffron, Université Paris-Dauphine, Paris Sciences et Lettres Research University, Laboratoire d'Économie de Dauphine (LEDa), EA 4404, IRD UMR 225

Through complex relations, the digital and environmental transitions are shaping socioeconomic trends during the first half of this new century. The digital transition leaves environmental footprints, directly (owing, in particular, to the consumption of energy) and indirectly (via the stimulus imparted to social practices, such as tourism). But digitization is a necessary condition for realizing the environmental transition, in particular for managing ever more complex energy systems. Plans for “smart cities” give us a glimpse of the huge potential for innovation at the conver-

gence of these two transitions and, too, of the disruptions in organizations. Methods of a “blockchain” type will stimulate peer-to-peer transactions that tend to decentralize the energy sector and conduce to the emergence of “carbon (or energy) currencies”.

Smart electric grids, a market on the edge of energy and domotics

Ivan Faucheux, director of the program Circular Economy/Energy, Commissariat Général à l'Investissement

“Intelligence” – a word derived from *intelligentia* in Latin, made up of the prefix *inte-* (“between”) and the root *lege-* (“choose, pick”) or *ligare* (“link”) – refers to all thought processes that enable a living being to adapt to new situations, to learn or understand and, above all, to act. Intelligence without action is futile. Artificial intelligence is now being installed on everyday objects. Everything is becoming “smart”: homes, buildings, grids... and, above all, the energy sector. Using the example of smart electric grids, this article establishes a few links between information and communication technology and the environmental transition in order to show that, if these two trends converge. A new type of economy – perhaps a smart economy – could emerge.

The digital society: A scenario for the energy transition by 2072

Nadia Maïzi, director of the Centre de Mathématiques Appliquées, Mines ParisTech–Institut Mines-Télécom, PSL Research University; **Edi Assoumou**, junior researcher at the Centre de Mathématiques Appliquées de Mines ParisTech–Institut Mines-Télécom, PSL Research University; and **Thomas Le Gallic**, doctoral student at the Centre de Mathématiques Appliquées de Mines ParisTech–Institut Mines-Télécom, PSL Research University

This forward-looking exercise focuses on the energy transition and the compatibility of a society where digital technology has been deployed with France’s goal of “carbon neutrality” by 2072. If we are not careful, climate programs might be compromised owing to the energy needed for information and communications technology. On the supply side, what digital techniques and objects are being designed to address climate problems? On the demand side, what lifestyle trends will this technology trigger in a “digital society”, and what impact will they have on energy consumption? Beyond the results of the scenario imagined herein, it is worthwhile examining a range of decision-making tools for laying out the pathways we would like to take.

2 - Digital technology, an accelerator of the energy transition?

Digital technology and energy: Between dreams and reality

Alain Bourdin, university professor, director of the journal *Revue Internationale d'Urbanisme*

Action needs to have grounds in the imagination if it is to be socially acceptable and move persons and users. The imagination has been tapped very little for the energy transition. "Technicist" visions have won out over those that arouse a positive imagination; there have been no words to soothe concerns about the accelerated impact of information and communications technology on everyday life. The few existing wisps of imagination are incapable of endowing changes in usages and behaviors with meaning, while the results obtained through pressure are not satisfying.

Digital technology and the energy transition

Laurent Michel, executive director of Energy and the Climate, Ministry of the Environmental Transition and Solidarity; and **Guillaume Meheut**, cabinet director in charge of internal coordination of R&D at the Directorate of Energy and Climate

The energy and digital transitions under way are fundamentally different. The first leads toward a desirable goal (a low-carbon economy and society), while the second should serve economic, social or environmental objectives. Nonetheless, the convergence of these two transitions opens tremendous opportunities. Information and communications technology provides new possibilities to everyone (consumers, groups, firms) thanks to the access to data and the emergence of more interactive, flexible and decentralized "energy models". Several problems must be addressed to profit from this technology's full potential: control the consumption of energy by digital machines, ensure the security of information systems, set up new services for creating economic value, and redefine public and private stakeholders' roles.

The issues and opportunities arising from open public data in the energy sector

Sylvain Moreau, head of the Service de La Donnée et des Études Statistiques (SDES), Commissariat Général du Développement Durable (CGDD), Ministry of Environmental Transition and Solidarity

As the Internet has grown, gigantic data files on consumption by households and firms have become potentially fertile sources for processing. Using them for statistics is not all that different from the work that public offices of statistics are used to doing with administrative files – apart from the wealth of time series and geographic information at an unprecedented level of detail that can be used to design ever more detailed indicators. Following the adoption of a new act on energy in France, public statisticians have a key role to play in making the information transmitted by producers and distributors available.

The electricity fairy's digital wand

Patrick Morilhat, head of a research program on improving the performance of nuclear power stations, Department of R&D, Électricité de France (EdF); and **Thomas Bladier**, head of the research program on customer relations, smart homes and digital technology for sales and energy services, Department of R&D, Électricité de France (EdF)

Électricité de France (EdF) is accelerating its digital transformation in order to provide a sure, competitive and lasting supply of low-carbon energy, to offer the services expected by customers and to reinforce its position among world leaders in the energy sector. The digitization of internal processes and of customer relations, the development of smart grids, and the recourse to virtual reality and artificial intelligence to simplify the design and operation of production processes: these innovations bring productivity gains but, too, lastingly change jobs in the company and, thus, modify the needed skills and qualifications. What advances to expect from the digital transformation under way at EdF? What questions will arise? How to involve the actors affected by this transformation at all levels? What are the keys to success, and the risk factors?

Energy producers in the XXIst century: Digital technology at the service of consumers and the energy transition

Fabien Choné, general manager, Direct Énergie

Direct Energie, a major player in France and Belgium, has compelled recognition as a well-balanced operator in the production and supply of electricity and natural gas. Having made innovation one of the major axes of its development, this firm is using digital technology for the energy transition and in response to consumer needs. Direct Energie, a supplier of "energy 4.0", is seeking to position itself as a leader in "orchestrating" the consumption of energy by its customers. Given this strong position as the single supplier of energy to its customers, the regulatory framework for data transmission must be reviewed to make it compatible with the "single contract", which binds a customer to a firm that both supplies and transports energy.

The digital revolution at the core of Engie's transformation

Gilles Bourgain, assistant manager of Strategy at the Engie Group; **Philippe Saintes**, in charge of futurological studies of electricity, Department of Strategy, Engie; **Vincenzo Giordano**, Observatoire des Technologies Digitales, Engie; **Étienne Géhain**, in charge of R&D programs on digital technology and storing energy at Engie; and **Maxime Weiss**, analyst in the Department of Strategy, Engie

More than two billion people on the planet do not have access to a reliable supply of electricity, even as greenhouse gas emissions are to approach zero in the long term. It is urgent to invent an energy system by drawing on current trends in technology and galvanizing political and industrial actors. The digital revolution is a tool for accelerating the energy revolution, a catalyst for changes in the energy

sector. In 2016, Engie underwent a thoroughgoing transformation in order to become the world leader in the energy revolution. Digital technology lies at the core of this transformation. It provides powerful leverage for cementing relations between the Engie Group and its stakeholders, making the group more operationally efficient, developing new business activities and improving agility.

Using the lever of innovation to make the energy transition successful

Jérôme Schmitt, director of Innovation and Energy Efficiency in the branch Gas, Renewables and Power at Total

From one major source of energy to the next, the energy sector has always been, and is still, undergoing changes, now at a buoyant rhythm. Classical business models sometimes have trouble keeping apace. The United Nations Climate Change Conference, COP21, is not irrelevant, nor the accelerated digitization of our societies, the rapidly falling costs of energy from renewable sources or natural gas's increased competitiveness with coal. Customer expectations are evolving too. As consumers, we do not pay any less attention to prices, but we are also reckoning more with our uses of energy and with the societal and environmental impact of our actions. Digital technology and artificial intelligence will help us foresee changes and steer a course. Thanks to leap-frogging, major technological solutions are now available (sometimes in simplified versions) on all continents. Some of the major players in energy will manage to adjust and turn restrictions into opportunities. Initially promoters of big projects or salesmen, they must also design integrated solutions for customers, private persons or firms, who are demanding an optimized consumption. More customer-oriented business models will take account of efficiency as well as the optimization of energy sources and of product life cycles; and if need be, will provide compensation. They will better foresee lower costs and technological trends. All these changes are a fertile ground for innovation. To profit from these opportunities, Total has not stopped evolving...

Digitization and the open management of data: New prospects for electricity distributors

Michel Derdevet, secretary general of Enedis (formerly ERDF)

At the core of both the energy transition and the digital revolution are the grids for distributing electricity during this era of big data. The electricity grid is becoming smarter and smarter, as it is equipped with sensors capable of providing information and data – the leading example being the 35 million smart electricity meters to be installed in French households by 2021. Backed by recent legislation, the trend toward open data is, for distributors, both a requirement and a lever: an economic, social and environmental requirement for enabling localities to prove their sense of responsibility and for developing innovative services for citizens; but also a lever for distributors to become operators who, processing dynamic data, are open to their ecosystem – a lever for making new business models emerge for the local management of energy.

The first neighborhood microgrid of shared energy, RennesGrid: A harbinger of the energy transition at the local level

Thierry Djahel, director of Development and Prospective Studies, Schneider Electric

To develop a concrete policy for saving energy and for the energy transition, the Rennes metropolitan area and Schneider Electric have launched RennesGrid, a 20-year experiment with managing energy consumption at Ker Lann, an urban development zone located in Bruz township, 12 kilometers southwest of Rennes, France. Covering more than 160 hectares, Ker Lann groups: approximately sixty companies specialized in high technology; seventeen establishments of higher education, research and training; and residential units and dormitories for students. RennesGrid will make it less dependent on carbon energy thanks to the production of local, renewable sources using photovoltaic installations. For consumers, the objective is to reduce their energy needs and consume a renewable form of energy produced locally. Planned for operation at the end of 2017 and endowed with a global investment budget of 5.8 million, this experiment is a private business with a hold over three hectares of land under a 20-year concession. Its business model is, however, mainly based on a cooperative approach (in particular with residents of the zone) and on innovative arrangements for participatory funding.

Controlling the energy footprints of corporate information services and networks

Laurent Benatar, director in charge of networks and information systems at Orange France

Telecommunications is the backbone of the digital revolution. Thanks to rapid technological progress, everyone now has permanent, inexpensive access to the Internet available everywhere at ever higher connection speeds. This availability is a real opportunity for sustainable development. For a telecommunications operator certified ISO 14001, like Orange, controlling the resulting environmental impact is a real issue. This control starts with the design of products and networks in a sector with a high turnover of material objects and considerable funds available for investment. A major concern is the everyday management of wastes from electronic equipment and from the consumption of electricity. Thanks to its ongoing efforts, Orange has obtained promising results, for example a significant reduction of energy consumption per usage.

The place of digital technology on the IEA's energy roadmaps

Kamel Ben-Naceur, International Energy Agency (IEA, Paris)

The International Energy Agency (IEA) has drafted roadmaps for the next four decades in collaboration with public and private producers and consumers of energy. For each type of energy, these roadmaps indicate the key elements for compliance with the objectives of the Paris Climate Agreement. They emphasize the role of digital technology, in particular smart grids, in the transition to-

ward a more digital and more intelligent energy system. The conditions necessary for successfully transforming this sector are mapped out, while attention is called to the risks inherent in this transition.

3 - Beyond energy: Digital technology and the environment

Digital technology and the environment

Françoise Berthoud, director of GDS EcoInfo, LPMMC, UMR 5493, CNRS/UJF

Juxtaposing in a single sentence “digital” and “environmental” does not leave us indifferent. In our societies, a belief prevails in the quasi magical power of information and communications technology to find solutions for environmental problems. True, we are more or less aware that we should not turn a blind eye to the consumption of energy by digital objects, nor to the related wastes. However this does not change one iota our collective belief, nor our actions. Between a fuzzy vocabulary, bits of utterly simplified information, “alternative facts” and fixed ideas, it is hard to form an accurate idea about the state of current knowledge on digital technology’s environmental impact. For this reason, let us return to the facts and avoid rushing into a new environmental catastrophe. We should see digital technology as a tool assisting the environmental transition but should also remain aware of the problems that will crop up in a digitized world. A critique of four false ideas provides the opportunity to review critical pieces of information about information and communications technology’s negative effects...

Digital technology and environmental research: Which direction?

François Jacq, president of the research alliance AllEnvi; and Benoît Fauconneau, executive at AllEnvi

Research issues in ecology are all the more important insofar as the various scenarios for an environmental transition call for a systemic approach and for special attention to interfaces and coupling effects. The digital sciences offer a form of understanding that increasingly relies on model-building, simulations and a control over data and algorithms. The digital and environmental transitions raise questions for each other, and they share approaches. The issues and opportunities in the coming years are three-fold: how to control complex systems and models of them on several scales (of time and space)? How to handle the proliferation of data that, though hard to process and control, opens new prospects? And how to equip public policy with instruments for interventions?

Photonics (the control of light) at the core of the environmental transition

Karl Geddardudrov, general manager of Opticsvalley, a high technology cluster in Île-de-France Region

At the core of the environmental transition, photonics is reinventing our lives: smart, sustainable cities (the production of renewable energy and optimization of energy consumption, above all by the telecommunications infrastructure), factories of the future (precise and cleaner pro-

cesses that consume fewer raw materials), etc. Photonic inventions (enhanced virtual reality and optical sensors) push in the same direction – toward the production of ecofriendly products in environmentally friendly factories. However they might go farther and be disruptive as they replace methods of mass production with individualized methods of production.

The Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS): A digital revolution at the service of the environment

Laurence Rouil, head of Environmental Simulation and Decision-Making, Institut National de l’Environnement Industriel et des Risques (INERIS)

After nearly ten years of exploratory research funded through European Commission programs, the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) became operational at the end of 2015: <https://atmosphere.copernicus.eu/>. In November 2014, the European Commission placed the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) in charge of steering and managing these operational services. CAMS proposes forecasts, maps and data about: the chemical composition of the atmosphere on a global scale, ozone in the stratosphere, ultraviolet radiation and the quality of air in Europe. These services have come out of the research that, conducted by approximately fifty teams in Europe, uses all sorts of tools (digital models) or data (in situ and via satellite) to make analyses and forecasts on different scales of space and time. A new era has opened with the availability of products for free that, with unparalleled quality and exhaustiveness, target users’ needs and focus on topics as sensitive as the ecology of the atmosphere.

Digital technology and precision agriculture

Jean-Paul Bordes, director of R&D, Arvalis-Institut du Végétal

The concept of precision agriculture emerged in France at the turn of the XXIst century, its objective being to provide the “right dose, at the right place, at the right time”. Its underpinnings are still solid: a plot of farmland is a heterogeneous living environment. For want of adapted materials and spatially specific agronomic advice, this heterogeneity has long been a handicap, since farmers could only adopt “average” practices for their fields. Reinforced by the progress made in digital technology, precision agriculture is turning this handicap into an opportunity. The digital revolution is now expanding into all branches of economic activity, including agriculture, and opening new perspectives thanks to the coming generations of sensors and of computationally intense information systems.

An environmental NGO’s viewpoint

Morgane Créach, director of Réseau Action Climat France (RAC-F)

Beyond positive examples, the relations between the digital and environmental transitions are far from natural. Not only does the digital transition have a major impact on the environment, but also many of the new uses and practices

resulting from it fall far short of a better conservation of our planet. The reason is simple: that is not the reason for being of digital technology. Should we continue thinking about these two transitions separately? Might certain innovations not be necessary for a revolution in the production and consumption of energy and in the means of transportation – especially if this revolution is to be conducted at a level and pace sufficient for shielding us from irreversible climate changes? Far from being the only instrument for the environmental transition, the digital transition has a role to play under certain conditions...

Accelerating Energy & Environmental Transition in Europe through digital

Julia Reinaud, Director I24C, **Nicolas Clinckx**, Vice-President Energy & Utilities, and **Paul Faraggi**, Manager Energy & Utilities Capgemini Consulting

Digitalization is becoming ubiquitous in the energy sector, enabling a more decentralized energy system and blurring the traditional energy sector boundaries, with more integration with buildings, mobility solutions and industry. Digitalization is accelerating the pace of the energy transition, mainly thanks to three levers: 1) enhancing customer interaction with the energy system, 2) optimizing operations, and 3) enabling new business models for traditional energy actors as well as opening up space for new entrants from other sectors and energy startups. Digital technologies are also facilitating a cost-effective, clean energy transition, mainly by increasing energy efficiency and flexibility, as well as enabling the integration of renewable electricity into smart(er) grids and developing low-carbon solutions.

This article gives a brief overview of the digitally-enabled innovations in Europe's energy markets and how various players are positioning themselves to take advantage of these opportunities. It concludes by highlighting some of the policy issues this transformation raises and the challenges ahead for European businesses to reap the benefits.

Can we believe in a “green” information and communications technology?

Fabrice Flipo, philosopher of sciences and techniques, Laboratoire LCSP, Mines-Télécom/TEM

Information and communications technology seems to have come at the right time in response to the issues related to sustainable development. It allows for a “control

of control”, for which the philosopher Michel Serres has called in *The Natural Contract*. Nowadays however, it seems to be at the service of economic growth alone.

Miscellany

Water policy governance

Aziza Akhmouch, head of the program on the governance of water, OECD; and **Delphine Clavreul**, policy analyst for the program on the governance of water, OECD

For decision-makers everywhere around the world, climate change, demographic pressure and intense urbanization are major factors for managing the water supply. Owing to both the inherent characteristics (multiscale, multiactor, multitemporal) of water management and its very heavy externalities in essential fields (such as public health, agriculture, energy and rural and urban planning), the governance of the water supply is essential to successfully drafting and implementing public water policies conducive to: local economic development, conservation of the environment and the well-being of citizens. Since 2010 (especially since its adoption of a set of water governance principles), the OECD has been advising governments, at all levels, about drafting and implementing water policies. The goal is to improve systems of governance for managing water resources that are too abundant or too scarce, or that are of poor quality, in a way that is sustainable, integrated and inclusive.

Water boards: Prospective retrospection

Bernard Barraqué, senior researcher emeritus of the CNRS, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED); and **Patrick Laigneau**, free-lance consultant

To fund water boards, a minimal principle of subsidiarity might be accepted in order to move toward managing water resources as a common good. According to their charters, water boards are neither state establishments, which levy taxes, nor “water markets”, which have difficulty operating (even in the United States, due to transaction costs). They are public establishments at the service of users; their official assignment is to protect the environment as effectively as possible through agreements between boards (as in the Ruhr).

Issue editors: Richard Lavergne and Hélène Serveille

Transición digital y transición ecológica

Prólogo

Laurence Monnoyer-Smith, Comisaria General para el Desarrollo Sostenible, Delegada interministerial para el Desarrollo Sostenible

Introducción

Hélène Serveille y Richard Lavergne, Ingenieros generales de Minas, Consejo General de la Economía (CGE)

1 - Ámbito digital y ecología, dos esferas en constante evolución

Cómo hacer que la transición digital y ecológica converjan

Damien Demailly, Instituto de Desarrollo Sostenible y de Relaciones Internacionales (IDDR), Renaud Francou, Fundación Internet Nueva Generación (Fing), Daniel Kaplan, Fundación Internet Nueva Generación (Fing), y Mathieu Saujot, Instituto de Desarrollo Sostenible y de Relaciones Internacionales (IDDR)

La transición ecológica es una etapa ineludible para nuestras sociedades; asimismo, la transición digital es la mayor fuerza transformadora de nuestra época. La primera transformación tiene un objetivo muy claro, aunque los medios para alcanzarlo no lo sean; la segunda afecta nuestra vida cotidiana, es una fuerza permanente de cambio, pero que no tiene un objetivo colectivo definido. Una tiene el fin, la otra los medios. Cada una de estas dos transiciones necesita de la otra. Sin embargo, sus responsables actúan frecuentemente por separado, sin darse cuenta del potencial transformador que representaría su convergencia.

En estas condiciones, ¿qué hacer para que estas grandes transiciones contemporáneas converjan?

Cómo se relacionan la transición digital la y transición ecológica

Patrice Geoffron, Universidad Paris-Dauphine, Paris Sciences et Lettres Research University, Laboratorio de economía de Dauphine (LEDA), EA 4404, UMR IRD 225

Las transiciones digital y ecológica han estructurado los cambios socioeconómicos de los últimos 50 años a través de relaciones complejas. Por un lado, la transición digital deja una huella ecológica directa (debido al consumo de energía, en particular) e indirecta (a causa de las prácticas sociales que el ámbito digital permite desarrollar, como el turismo). Pero, por otro lado, la digitalización es una condición esencial para la realización de la transición ecológica; en particular, para responder a la dificultad del manejo de los sistemas energéticos. El desarrollo de

proyectos de *smart cities* anuncia desde ya el gran potencial de innovaciones que se pueden lograr si estas dos transiciones convergen, al igual que ciertas rupturas organizativas. Desde esta perspectiva, los mecanismos de tipo «*blockchain*» apoyan las transacciones entre pares propicias para la descentralización energética y el desarrollo de «monedas-carbono» o «monedas-energía».

Las redes eléctricas inteligentes, un mercado en el punto de encuentro de la energía y la domótica

Ivan Faucheux, Director del programa «Energía - Economía Circular», Comisaría General para la Inversión

La Inteligencia, palabra derivada del latín *intelligentia*, formada del prefijo *inter-* (entre) y de la raíz *legere* (elegir, recoger) o *ligare* (atar), representa el conjunto de procesos de pensamiento de un ser vivo que le permiten adaptarse a situaciones nuevas, aprender o comprender y, sobre todo, actuar. Hoy en día, todo se convierte en inteligente o «smart» (*smart homes*, *smart buildings*, *smart grids*, *smart mobility*, etc.), en particular en el ámbito de la energía. Ahora bien, sin querer citar a Michel Audiard, una inteligencia sin acción es estéril. Tomando como ejemplo las redes eléctricas inteligentes, en este artículo se trata de establecer algunos vínculos entre las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC) y la transición ecológica para demostrar que puede haber, en el punto de encuentro de estos dos movimientos, una verdadera economía por desarrollar, de un nuevo tipo y quizá realmente inteligente.

La «*Digital Society*», un escenario de transición energética hacia el año 2072

Nadia Maïzi, Directora del Centro de Matemáticas Aplicadas, Mines ParisTech - Institut Mines - Télécom, PSL Research University, Edi Assoumou, Encargado de investigaciones en el Centro de Matemáticas Aplicadas de Minas ParisTech - Institut Mines - Télécom, PSL Research University, y Thomas El Gallic, Estudiante de doctorado en el Centro de Matemáticas Aplicadas de Minas ParisTech - Institut Mines - Télécom, PSL Research University

A través de un ejercicio prospectivo centrado en el tema de la transición energética, el artículo examina la compatibilidad entre una «*Digital Society*», basada en el desarrollo digital, y la búsqueda de un objetivo de neutralidad de emisiones de carbono para Francia hacia el año 2072. Para ello, se considera la oferta tecnológica «digital» dedicada a los problemas climáticos, cuyo balance, si no se tiene cuidado, podría verse en peligro por su materialidad energética. Al mismo tiempo, se analiza el problema de la demanda, teniendo en cuenta la evolución del estilo de vida que la opción «*Digital Society*» crearía y sus consecuencias sobre el consumo energético. Más allá de

los resultados relativos al caso particular que hemos imaginado, este estudio demuestra el interés de desarrollar herramientas de ayuda a la toma de decisiones con un enfoque prospectivo con el fin de construir los caminos que deseamos emprender.

2 - El ámbito digital, ¿herramienta y acelerador de la transición energética?

Ámbito digital y energía, entre sueño y realidad

Alain Bourdin, Profesor universitario, Director de la *Revisita Internacional de Urbanismo*

Toda acción necesita basarse en la imaginación para que pueda movilizar a los actores y los usuarios y ser aceptable socialmente. En el artículo se muestra el poco uso de la imaginación en lo relacionado con la transición energética, la energía y sus relaciones. Las visiones tecnicistas están por encima de las que movilizan una imaginación positiva. Ninguna historia trata de tranquilizar a la población sobre los efectos de la aceleración de la vida cotidiana provocados por las tecnologías digitales. Por último, los pocos elementos imaginarios existentes no pueden darles sentido a los cambios de uso y comportamiento; al mismo tiempo, los resultados obtenidos mediante la coacción no son satisfactorios.

Ámbito digital y transición energética

Laurent Michel, Director General de energía y clima en el Ministerio de la Transición ecológica y solidaria, y Guillaume Meheut, Encargado de temas de coordinación interna y del seguimiento de la I+D y la innovación en la Dirección General de Energía y Clima, como director de gabinete

Las transiciones energética y digital son dos cambios importantes actuales totalmente diferentes: la primera nos lleva hacia un objetivo deseable, es decir una economía y una sociedad con emisiones de carbono bajas. Por su parte, la segunda es un medio que se debe poner al servicio de objetivos superiores (económicos, sociales o ambientales).

Sin embargo, la combinación de ambas transiciones nos ofrece oportunidades formidables: el campo digital ofrece nuevas oportunidades a todos los usuarios (consumidores, comunidades, empresas) mediante un mayor acceso a los datos y la aparición de modelos energéticos más interactivos, flexibles y descentralizados.

Se deben tener en cuenta muchos aspectos para poder aprovechar al máximo este potencial digital: controlar el consumo energético de los propios instrumentos digitales, garantizar la seguridad de los sistemas digitales, crear nuevos servicios de valor añadido y replantear el papel de los actores públicos y privados.

Retos y oportunidades de la apertura de datos públicos en materia de energía

Sylvain Moreau, Jefe del servicio de datos y estudios estadísticos (SDÉS), Comisaría General del Desarrollo Sostenible (CGDD), Ministerio de la Transición ecológica y solidaria

Como consecuencia del desarrollo de Internet, los enormes archivos de datos producidos por la actividad de los gigantes del sector, derivados, por regla general, de los modos de consumo de los hogares y las empresas, representan unas bases de estudio de extrema riqueza. Su uso en el contexto de la estadística pública no difiere mucho del trabajo que ésta realiza habitualmente a partir de registros administrativos. Lo único es que estos datos permiten, a menudo, disponer de una riqueza de información geográfica y temporal que facilitan la elaboración de más indicadores, cada vez más detallados. A raíz de la aplicación de la ley Energía, los agentes de la estadística pública desempeñan un papel esencial en la puesta a disposición de la información transmitida por los productores y distribuidores. Los datos ya disponibles muestran un nivel de detalles geográficos nunca antes logrado. La evolución que desde ya se prevé tendrá un impacto significativo en los sistemas de información estadísticos sobre la energía y los modos de trabajo de la estadística pública.

La varita digital del hada Electricidad

Patrick Morilhat, EDF, Dirección de la I+D, Responsable del programa de investigación sobre la mejora del rendimiento de las centrales nucleares, y Thomas Bladier, EDF, Dirección de la I+D, Responsable del programa de investigación e innovación sobre la relación cliente, casa inteligente (*smart home*) y el ámbito digital para las actividades de comercialización y servicios energéticos

Con el fin de garantizar y mantener el suministro de una energía segura y competitiva, que emita poco carbono, ofrecer los servicios que esperan sus clientes y consolidar su posición en el pelotón delantero de los líderes mundiales de la energía, EDF acelera su transformación digital. Digitalización de los procesos internos, digitalización de la relación cliente, desarrollo de redes inteligentes, uso de la realidad virtual e inteligencia artificial para simplificar el diseño y la operación de los activos industriales de producción: éstas son algunas de las innovaciones que permiten una mayor productividad, pero que también cambian permanentemente la manera de ejercer los diversos oficios de la empresa y, por lo tanto, los conocimientos necesarios para su realización.

¿Qué ganancias se pueden esperar de la transformación digital que EDF está realizando? ¿Qué desafíos plantea? ¿Cómo hacer que los actores implicados en esta transformación se integren lo más pronto posible a todos los niveles? ¿Cuáles son las claves del éxito y los factores de riesgo? En el artículo se trata de responder a estas preguntas.

El experto en energía del siglo XXI

El ámbito digital al servicio del consumidor y de la transición energética

Fabien Choné, Director General Delegado de Direct Énergie
 Protagonista principal en el campo de la energía en Francia y Bélgica, Direct Énergie se ha impuesto como un operador equilibrado, presente tanto en la producción y suministro de electricidad como de gas natural. En este contexto, Direct Énergie ha hecho de la innovación uno

de los ejes principales de su desarrollo, al comprometerse directamente con el uso de tecnologías digitales al servicio de la transición energética y de las necesidades del consumidor. En su papel de proveedor de energía «4.0», la empresa desea posicionarse como un verdadero «director de orquesta» del consumo de energía para sus clientes. Sin embargo, este cambio del posicionamiento del proveedor como único interlocutor del cliente requiere una redefinición del marco normativo aplicable a la transmisión de datos para que sea coherente con el dispositivo del «contrato único» (entre el cliente y un proveedor que garantice a la vez el suministro y la distribución de la energía).

La revolución digital, en el corazón de la transformación de ENGIE

Gilles Bourgain, Director-adjunto de la estrategia del grupo ENGIE, Philippe Saintes, Dirección de la estrategia del grupo ENGIE, encargado de los estudios prospectivos en el ámbito de la electricidad, Vincenzo Giordano, Observatorio de tecnologías digitales de ENGIE, Étienne Géhain, Encargado de los programas de I+D *Corporate* de ENGIE sobre tecnologías digitales y almacenamiento de energía, y Maxime Weiss, Analista en la Dirección de la estrategia del grupo ENGIE

En el mundo, más de dos mil millones de personas no tienen acceso a una electricidad fiable; al mismo tiempo, las emisiones de gases de efecto invernadero a largo plazo deberían ser casi nulas. Por ello, es urgente inventar un nuevo sistema energético que aproveche los cambios tecnológicos actuales y la movilización de los actores políticos e industriales. La revolución digital es una de las mejores herramientas para acelerar esta revolución energética. Es también un catalizador de cambio del sector de la energía. En 2016, ENGIE ha iniciado una profunda transformación para ser el líder mundial de la revolución energética. El ámbito digital es el núcleo de esta transformación. Es una palanca transformadora poderosa que permite aumentar la consolidación del grupo con sus partes interesadas, para aumentar su eficiencia operativa, desarrollar nuevos *business* y aumentar su agilidad.

El éxito de la transición energética al utilizar la innovación

Jérôme Schmitt, Director de innovación y eficiencia energética del nuevo departamento Gas, Renewable and Power de Total

De una fuente principal a otra, el mundo de la energía ha estado siempre en constante evolución. Esta mutación permanente se vive ahora a un ritmo acelerado y nuestros modelos clásicos a veces no logran anticiparla. El impacto de la COP21 contribuye a ello, al igual que la digitalización acelerada de la sociedad, la rápida disminución de los costes de las energías renovables o la mayor competitividad del gas comparado con el carbón. Del lado de los clientes, las expectativas también están cambiando. Como consumidores, estamos siempre atentos al coste, pero también estamos cada vez más atentos a la experiencia del usuario y al impacto social y ambiental de nuestras acciones. El ámbito digital y la inteligencia artificial nos permiten un mejor control y anticipación. Cada vez más tratamos de utilizar en vez de poseer.

Gracias al «*leap frogging*», las principales soluciones tecnológicas están al alcance (en ciertos casos en versiones simplificadas) de todos los continentes. Los principales actores de la energía sabrán, en su mayoría, evolucionar para transformar estas limitaciones en oportunidades. De su papel inicial de desarrolladores de proyectos gigantes y vendedores de productos, deberán convertirse en diseñadores de soluciones integradas para el beneficio de clientes, tanto industriales como particulares, en búsqueda de un consumo y un confort cada vez más optimizados.

Los *Business Models*, más cercanos al cliente, integrarán los conceptos de eficiencia, optimización de las fuentes y del ciclo de vida y, en ocasiones, de compensación. Podrán anticipar cada vez más las reducciones de costes y los cambios tecnológicos. Todas estas transformaciones son un buen terreno para la innovación. Para poder aprovechar mejor todas estas oportunidades, Total no deja de evolucionar.

Digitalización y administración abierta de datos, nuevos horizontes para los distribuidores de energía eléctrica

Michel Derdevet, Secretario general de Enedis (antiguamente ERDF)

En plena transición energética y revolución digital, las redes de distribución de electricidad han entrado de lleno en la era de los *Big Data*. La red eléctrica es cada vez más «inteligente», gracias a sus múltiples sensores capaces de proporcionar información y datos. En primera línea de ellos se encuentran los 35 millones de contadores comunicantes que se instalarán en los hogares franceses de ahora al 2021. Apoyado por las recientes evoluciones legislativas, el movimiento hacia los *Open Data* se ha convertido a la vez en una exigencia y una ventaja para los distribuidores: exigencia económica, social y ambiental que permite que los territorios ejerzan sus responsabilidades y faciliten el desarrollo de nuevos servicios innovadores para los ciudadanos; ventaja para transformarse y convertirse en el futuro de verdaderos operadores de datos dinámicos y abiertos en su ecosistema, y favorecer el surgimiento de nuevos modelos económicos de gestión local de la energía.

Primer *microgrid* de barrio con energía compartida, RennesGrid® es el precursor de la transición energética a pequeña escala

Thierry Djahel, Director Desarrollo y prospectiva, Schneider Electric

Deseosos de comprometerse concretamente en una política de ahorro de energía y transición energética, Rennes Métropole y Schneider Electric, han iniciado el proyecto RennesGrid® que trata de experimentar durante los próximos veinte años el control energético de la Zona de Actividad Comercial de Ker Lann. Situada en el municipio de Bruz, a 12 kilómetros al suroeste de Rennes, esta zona de más de 160 hectáreas presenta la particularidad de ser un campus que agrupa unas 60 empresas especializadas en la alta tecnología, 17 escuelas de educación superior e investigación y centros de formación, así como edificios residenciales y de alojamiento para estudiantes.

RennesGrid® permitirá al Campus de Ker Lann ser más independiente con relación a las energías que emiten carbono gracias a la producción de energía renovable local a partir de instalaciones fotovoltaicas. La ventaja para los usuarios del sitio es doble: reducir sus necesidades energéticas y autoconsumir una energía renovable producida localmente.

Este experimento, realizado por Schneider Electric en asociación con Rennes Métropole y el municipio de Bruz, que debe ponerse en marcha a finales de 2017 con un presupuesto global de inversión de 5,8 millones de euros, se basa en un modo de operación privada (sociedad por acciones simplificada) con una zona de influencia de una superficie de tres hectáreas, gracias a una concesión de 20 años. Ahora bien, el modelo económico de este proyecto se construye ante todo en torno a un enfoque colaborativo (en particular con los residentes de la ZAC) acompañado de un mecanismo de financiación participativo e innovador.

El control de la huella energética de los servicios informáticos (SI) y las redes empresariales

Laurent Benatar, Director Técnico de Orange Francia encargado de las redes y sistemas de información

El sector de las telecomunicaciones es la columna vertebral de la revolución digital. Gracias a los rápidos avances tecnológicos, todo el mundo puede disponer de conexiones permanentes, no muy costosas y a velocidades cada vez mayores. Esta disponibilidad es una verdadera oportunidad para el desarrollo sostenible de toda la sociedad. Sin embargo, para un operador de telecomunicaciones certificado ISO 14001, como es el caso de Orange, el control del impacto ambiental inherente es un verdadero reto. Éste comienza con el diseño de productos y las redes, en un sector en el que las renovaciones de materiales son frecuentes y las inversiones elevadas. Por otra parte, se presta una gran atención a la gestión diaria de los residuos de aparatos electrónicos y al consumo de electricidad. Gracias a sus constantes esfuerzos, Orange ha obtenido resultados alentadores; por ejemplo, reduciendo considerablemente el consumo de energía relacionado con cada uso.

El lugar del mundo digital en las hojas de ruta de prospectiva energética de la Agencia Internacional de Energía

Kamel Ben-Naceur, Agencia Internacional de Energía (París)

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) ha desarrollado hojas de ruta de prospectiva energética en colaboración con los sectores (públicos y privados) productores y consumidores de energía. Estas hojas de ruta, que cubren las próximas cuatro décadas, permiten definir, para cada sector energético, los elementos clave que garantizan un futuro compatible con los objetivos del Acuerdo de París sobre el clima. En estas hojas de ruta, el énfasis se realiza sobre el papel del ámbito digital, especialmente en relación con las redes inteligentes (*smart grids*). En ellas se establecen las bases de la transición hacia un sistema energético más digital y más inteligente, así como las

condiciones necesarias para el éxito de la transformación del sector. También se estudian los riesgos inherentes a esta transición.

3 - Más allá de la energía, mundo digital y medioambiente

Mundo digital y ecología

Françoise Berthoud, Directora del GDS EcoInfo, LPMMC, UMR 5493, CNRS/UJF

Utilizar en una misma frase las palabras «digital» y «ecología» no es una decisión neutra. En nuestras sociedades existe una creencia en el poder casi mágico que tiene lo digital para resolver los problemas ambientales. Es cierto que estamos todos más o menos conscientes de que el consumo energético de los equipos implicados es considerable y que conviene prestarles una atención particular, al igual que a los residuos generados, pero esto no altera nuestra creencia colectiva ni nuestros actos. Entre vocabulario ambiguo, informaciones parciales o extremadamente simplificadas, mentiras y mitos, es difícil hacerse una idea clara del estado de nuestros conocimientos sobre los impactos ambientales de las tecnologías digitales. Por ello, parece necesario analizar las pruebas y evitar a toda costa una nueva catástrofe ecológica. Conviene también pensar en lo digital como una herramienta de ayuda a la transición ecológica siendo conscientes de los retos que se deberán afrontar en el mismo mundo digital.

En este artículo se propone un análisis crítico de cuatro ideas falsas; esto nos brinda la oportunidad de estudiar la información más crítica sobre los impactos negativos de las TIC.

Mundo digital e investigación ambiental, ¿cuáles son los últimos cambios?

François Jacq, Presidente de la Alianza de Investigación AllEnvi, y **Benoît Fauconneau**, Secretario Ejecutivo AllEnvi

La investigación ambiental enfrenta retos cada vez mayores ya que las diversas transiciones ambientales implican un enfoque sistémico y se debe prestar una atención especial a las interfaces y a sus vínculos. Asimismo, las ciencias digitales son el soporte de una comprensión que se basa cada vez más en la elaboración de modelos, el control de datos y la algorítmica. Los dos ámbitos se interrogan mutuamente y se alimentan de las mismas preguntas y enfoques. En los próximos años, los retos y las oportunidades conducirán hacia un cierto tríptico: el control de sistemas complejos y su representación a escalas múltiples (tanto temporales como espaciales); la respuesta al desafío de datos crecientes, difíciles de utilizar y controlar, pero también fuente de nuevas perspectivas; y la instrumentación del apoyo a las políticas públicas.

La fotónica (control de la luz), esencia de la transición ecológica

Karl Geddardudrov, Director General de Opticsvalley, red de alta tecnología en la región Île-de-France

La fotónica reinventa nuestra vida al estar en el corazón de la transición ecológica: en las ciudades sostenibles e

inteligentes (optimización del consumo de energía, producción de energía renovable, optimización energética de las infraestructuras de telecomunicaciones) y las fábricas del futuro (procesos menos consumidores de materias primas, más precisos y limpios). El aporte de la fotónica a través de la realidad aumentada y la digitalización que permiten los sensores ópticos no sólo abunda en este sentido, nos permite elaborar también productos más respetuosos del medio ambiente (*eco-friendly*) en plantas que también lo son, aunque podría ir más allá en la ruptura y utilizar, en vez de nuestro modo de producción masivo, modos de producción individualizados.

Los servicios Copernicus Atmosphère (CAMS), una revolución digital al servicio del medio ambiente

Laurence Rouil, Responsable del centro de modelización ambiental y de decisiones del Instituto Nacional del medio ambiente industrial y de riesgos (Ineris)

Tras casi diez años de trabajos de investigación preparatorios, financiados por los programas de la Comisión Europea, los servicios europeos Copernicus de vigilancia de la atmósfera han entrado en una fase operativa a finales del año 2015 (<https://atmosphere.copernicus.eu/>). Cualquier usuario puede beneficiar de previsiones, cartografías y otros datos valorados sobre la composición química de la atmósfera a escala global, el ozono estratosférico, la radiación ultravioleta (UV) y la calidad del aire en Europa.

En noviembre de 2014, la Comisión Europea ha delegado al Centro Europeo de Predicción ECMWF la dirección y gestión de los servicios operativos reunidos bajo la apelación CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Services*). Éstos son el resultado de importantes trabajos de investigación realizados por casi 50 equipos europeos que operan todo tipo de herramientas (modelos digitales) o de datos (*in situ* y satélite) para elaborar diagnósticos y pronósticos a distintas escalas de espacio y tiempo. Una nueva era comienza con la puesta a disposición libre y gratuita de productos inéditos por su calidad y su exhaustividad, centrados en las necesidades de los usuarios y dirigidos a temas tan sensibles como el medio ambiente atmosférico.

Ámbito digital y agricultura de alta precisión

Jean-Paul Bordes, Director Investigación y Desarrollo, Arvalis - Instituto del mundo vegetal

La agricultura de alta precisión es un concepto que ha nacido en Francia a comienzos de los años 2000 con el objetivo de aportar «la dosis correcta, en el lugar correcto, en el momento adecuado». La idea se basa en una constatación cierta, que afirma que toda parcela agrícola es un medio vivo y heterogéneo. Por falta de materiales adaptados y consejos agronómicos espacializados, durante mucho tiempo esta heterogeneidad ha sido un obstáculo para una actividad agrícola que sólo sabía gestionar las prácticas medias de cada parcela. La revolución digital, que hoy tiene un impacto en todos los sectores de actividad, incluida la agricultura, abre nuevas perspec-

tivas con la última generación de sensores y la potencia de los sistemas de información. La agricultura de alta precisión, reforzada por los progresos en el ámbito digital, permite transformar esta desventaja en una oportunidad de progreso.

El punto de vista de una ONG ambiental

Morgane Créach, Directora de la Red Acción Clima Francia (RAC-F)

Los vínculos entre transición digital y transición ecológica, más allá de ilustraciones positivas, no parecen ser muy naturales. No sólo la transición digital tiene un impacto importante sobre el medio ambiente, sino que también los usos y las nuevas maneras de “hacer” que genera están lejos de orientarse hacia una mayor protección del planeta. La razón es muy sencilla, ésta no es su vocación primera.

Sin embargo, ¿se debe seguir considerando estas dos transiciones en paralelo?

La revolución de nuestros modos de producción y consumo de energía y de nuestros modos de transporte ¿podrá dejar de lado el beneficio de algunas innovaciones, si se desea que se realicen a un nivel y a un ritmo suficiente para ponernos a salvo de una alteración climática irreversible?

Sin que sea el único instrumento en el que la transformación ecológica de nuestras sociedades debe basarse, la transición digital debe, bajo ciertas condiciones, desempeñar un papel crucial.

Accelerating Energy & Environmental Transition in Europe through digital

Julia Reinaud, Director I24C, **Nicolas Clinckx**, Vice-President Energy & Utilities, and **Paul Faraggi**, Manager Energy & Utilities Capgemini Consulting

Digitalization is becoming ubiquitous in the energy sector, enabling a more decentralized energy system and blurring the traditional energy sector boundaries, with more integration with buildings, mobility solutions and industry. Digitalization is accelerating the pace of the energy transition, mainly thanks to three levers: 1) enhancing customer interaction with the energy system, 2) optimizing operations, and 3) enabling new business models for traditional energy actors as well as opening up space for new entrants from other sectors and energy startups. Digital technologies are also facilitating a cost-effective, clean energy transition, mainly by increasing energy efficiency and flexibility, as well as enabling the integration of renewable electricity into smart(er) grids and developing low-carbon solutions.

This article gives a brief overview of the digitally-enabled innovations in Europe's energy markets and how various players are positioning themselves to take advantage of these opportunities. It concludes by highlighting some of the policy issues this transformation raises and the challenges ahead for European businesses to reap the benefits.

¿Se puede creer en las TIC ecológicas?

Fabrice Flipo, Filósofo de la ciencia y tecnología, Mines-Télécom/TEM, Laboratorio LCSP

El ámbito digital parece haber llegado en el momento oportuno para enfrentar los desafíos de desarrollo sostenible y aportar ese «control del control» que Michel Serres exigía en su *Contrato Natural*. Hoy, parece más bien ponerse al servicio del único crecimiento económico.

Otros temas

Gobernar las políticas del agua

Aziza Akhmouch, Responsable del Programa sobre la gobernanza del agua de la OCDE, y **Delphine Clavreul**, Analista de políticas relacionadas con el Programa sobre la gobernanza del agua de la OCDE

El cambio climático, las presiones demográficas y la creciente urbanización representan, para los responsables de todo el mundo, retos considerables en materia de gestión del agua. Las características intrínsecas de la gestión del agua (diferentes escalas, diferentes actores, diferentes temporalidades) y sus externalidades considerables en ámbitos tan importantes como la salud pública, agricultura, energía y el desarrollo territorial hacen que su «gobernanza» sea una condición para el éxito esencial para la elaboración y aplicación de políticas públicas que contribuyan al desarrollo económico de los territorios, la preservación del medio ambiente y el bienestar de los

ciudadanos. Desde 2010, la OCDE brinda consejo a los gobiernos, a todos los niveles, sobre la manera de crear y aplicar las políticas del agua, especialmente desde la aprobación de los principios de la OCDE sobre la gobernanza del agua, cuyo objetivo es mejorar los sistemas de gestión para poder controlar los recursos hídricos presentes en grandes o pequeñas cantidades (o de muy mala calidad) de manera sostenible, integrada e inclusiva.

Agencias del agua, retrospectiva prospectiva

Bernard Barraqué, Director de investigación emérito del CNRS (Centro Internacional de Investigación sobre el medio ambiente y el desarrollo - CIRED), y **Patrick Laigneau**, Consultor independiente

En la financiación de las agencias del agua, habría que aceptar un mínimo de subsidios para avanzar hacia una gestión del bien común. Según sus principios fundadores, estas agencias no son ni establecimientos públicos del Estado que colectan los impuestos, ni facilitadores de los «mercados del agua» (que no funcionan como deberían, incluso en los Estados Unidos, debido a los costes de las transacciones). Son establecimientos públicos cualitativos al servicio de sus usuarios reunidos para proteger el medio ambiente de la manera más eficaz posible poniéndose de acuerdo, al igual que su modelo inicial en la región del Ruhr.

El dossier ha sido coordinado por Richard Lavergne y Hélène Serveille

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

L'eau douce dans le monde, comment gérer un bien commun ?



Avant-propos - **Pierre ROUSSEL**

Les enjeux liés au régime physique

Agir pour l'eau au sein de la Convention Climat - **Jean-Luc REDAUD**

L'eau, l'alimentation et le climat : revenir aux sources du développement durable - **Guillaume BENOIT**

Eau potable : enfin un espoir pour des milliards de personnes !

Gérard PAYEN

Les eaux souterraines - **Ghislain de MARSILY** et **Mustapha BESBES**

L'hydroélectricité, le mariage de l'eau et de l'énergie - **Yves GIRAUD**

La biodiversité des milieux aquatiques continentaux en France métropolitaine : état des lieux et menaces - **Paul MICHELET**

Les enjeux politiques et sociaux

Water Supply to Big Cities: Training and Development Initiatives Implemented by South Africa's Largest Water Board: A Focus on the City of Johannesburg (Gauteng province, South Africa)

Wayida MOHAMED, Maußen MILES, Asief ALLI, Poppie SERA and **Hendrik EWERTS**

La crise de l'eau ou la perpétuelle gestion des conflits - **Léna SALAMÉ**

Hydro-diplomatie et Nouvelle masse d'eau pour la paix au Moyen-Orient

Fadi Georges COMAIR

Water and Climate Change Policy: A Brief History for Future Progress

Maggie WHITE, John H. MATTHEWS, Karin LEXÉN, Sofia WIDFORSS and **Diego J. RODRIGUEZ**

Risques environnementaux et risques sanitaires liés à la contamination des eaux - **Pr. Yves LÉVI**

Les réponses institutionnelles et financières

La gestion de bassin s'impose partout dans le monde pour organiser l'adaptation au changement climatique - **Roberto RAMIREZ DE LA PARRA**

L'adaptation au changement climatique au centre d'une coopération franco-chinoise pour la gestion de l'eau par bassin

Chao LIN et **Gwendal LE DIVECHEN**

La gestion du risque inondation par l'État - **Marc MORTUREUX**

La prévention du risque d'inondation : faut-il se protéger ou s'adapter ? **Stéphanie BIDAULT**

Les services d'eau et d'assainissement en France : un modèle précurseur, aujourd'hui comme hier - **Bertrand CAMUS**

L'eau douce dans le monde. Comment gérer un bien commun ? L'action de l'Europe - **Michel DANTIN**

Le Conseil Mondial de l'Eau : un enjeu mondial pour une ressource locale **Sophie AUCONIE**

L'International Water Association (IWA), l'association des professionnels de l'eau et de l'assainissement - **Diane d'ARRAS**

Le Partenariat français pour l'Eau : la voix des acteurs français de l'eau à l'international - **Jean LAUNAY**

HORS DOSSIER

Les ressources minérales des grands fonds océaniques : des enjeux environnementaux majeurs - **Denez L'HOSTIS**

Prix du carbone et compétitivité

Fabrice DAMBRINE et **François VALÉRIAN**

Avril 2017

Ce numéro est coordonné par **Pierre ROUSSEL**

Pour plus d'information, nous invitons le lecteur à se reporter sur notre site :

<http://www.anales.org>

AKHMOUCH Aziza



D.R

Aziza Akhmouch est responsable du programme sur la gouvernance de l'eau de l'OCDE, qui accompagne les gouvernements des pays qui en sont membre dans la formulation et la mise en œuvre de leur politique de l'eau. Le programme développe des standards, produit des analyses économiques et mène des discussions sur les politiques publiques. Elle est l'auteure de plusieurs publications sur la gouvernance de l'eau et elle est la fondatrice de l'Initiative de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau, un réseau pluri-acteurs international. Elle est titulaire d'un doctorat et d'un DEA en géopolitique, ainsi que d'un DESS en affaires internationales.

ASSOUMOU Edî



D.R

Edî Assoumou est chargé de recherche au Centre de mathématiques appliquées de Mines ParisTech. Ses travaux portent sur la modélisation et l'analyse prospective des systèmes énergétiques, plus particulièrement sur les interactions entre choix technologiques et objectifs de politique énergétique. Il est impliqué notamment dans différents

projets portant sur l'étude des systèmes électriques, la mobilité électrique et les systèmes énergétiques urbains. Titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'École nationale d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble (2001), il a suivi, en 2002, une spécialisation de 3^{ème} cycle en optimisation des systèmes énergétiques, puis, en 2006, il a soutenu une thèse de doctorat en économie et finances portant sur l'élaboration d'un modèle MARKAL de prospective énergétique pour la France.

BARRAQUÉ Bernard



D.R

Ingénieur civil des mines et urbaniste diplômé de Harvard, Bernard Barraqué est directeur de recherche CNRS émérite, il est rattaché au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (UMR 8568). Il traite de façon comparative et historique, à l'échelle de l'Europe et dans certains pays émergents, du partage des ressources en

eau et de la gestion durable des services publics d'eau et d'assainissement, et s'intéresse aux liens entre ces deux dimensions. Il a notamment coordonné, entre 2009 et 2013, une recherche ANR sur la durabilité des services d'eau dans les grandes villes (<http://eau3e.hypotheses.org>).

org). En 2016, il a coordonné le numéro 487 de la *Revue des Ingénieurs (Mines)* consacré à l'eau.

BENATAR Laurent



D.R

X promotion 1987 et ingénieur du corps des Mines (Télécom), Laurent Benatar rejoint en 1992 le groupe Orange, pour y exercer encore aujourd'hui. Il a alterné des activités de management opérationnel dans le domaine technique et des responsabilités fonctionnelles dans les domaines du service client, des réseaux et des systèmes d'information.

De 1999 à 2001, il a été chef de projet du lancement de l'ADSL à Paris. En 2007, il a été nommé directeur des processus opérationnels et a pris, en 2010, la responsabilité des systèmes d'information, une direction transversale ouverte sur tous les univers (fixe, mobile) et tous les marchés (grand public, entreprises, marché de gros).

Depuis 2013, il est le directeur technique d'Orange France, où il est en charge des réseaux et des systèmes d'information.

BEN-NACEUR Kamel



D.R

Kamel Ben-Naceur est le directeur du développement durable, des technologies et des perspectives énergétiques de l'Agence Internationale de l'Énergie à Paris. Il justifie de plus de 35 ans d'expérience dans les domaines de l'énergie et de l'industrie, que ce soit dans le secteur public ou privé, et dans plusieurs zones géographiques du monde. Il a

débuté sa carrière professionnelle à Schlumberger dans le domaine de la recherche et développement, avant d'occuper des postes de responsabilité au sein de la direction générale du groupe Schlumberger. En 2014, il est nommé ministre de l'Industrie, de l'Énergie et des Mines de la Tunisie, il est en charge de plusieurs réformes dans les secteurs relevant de sa compétence, incluant l'adoption de la loi sur les énergies renouvelables et la réforme des subventions énergétiques. Il est diplômé de l'École polytechnique de Paris et de l'École Normale Supérieure (Rue d'Ulm), il justifie d'une agrégation de mathématiques.

BERTHOUD Françoise



D.R

Ingénieure de recherche au CNRS, en poste au laboratoire GRICAD à Grenoble, Françoise Berthoud justifie d'une formation en écologie et en informatique. Elle s'est investie durant une vingtaine d'années dans la gestion de systèmes informatiques

et le déploiement de moyens servant à la modélisation et à la simulation numérique. Depuis une dizaine d'années, elle anime le groupement Ecolinfo du CNRS, qui œuvre en matière d'informatique éco-responsable à l'amélioration de la connaissance, de la sensibilisation, au développement de la formation, et qui fait profiter de ses expertises sur les impacts des TICs. Elle est co-auteur de l'ouvrage « Impacts écologiques des TICs. Les faces cachées de l'immatérialité » paru aux Éditions EDP en 2012 et participe à nombre de conférences et productions sur cette thématique.

BLADIER Thomas

Thomas Bladier a commencé sa carrière en 1994 chez Bossard Consultants, où il a travaillé sur la relation client et le *marketing* des acteurs des Télécoms. À partir de 2004, il travaille dans le secteur de l'énergie, notamment à la mise en œuvre de projets de croissance, de développement international et de *marketing* stratégique. En 2013, il rejoint EDF, où, à la direction de la R&D, il est en charge du programme de recherche et innovation sur la relation client, la *smart home* et le numérique pour les activités de commercialisation et de services énergétiques.

BORDES Jean-Paul



D.R

Ingénieur agricole de formation, Jean-Paul Bordes est, depuis 2011, directeur du département R&D d'Arvalis - Institut du végétal. Il a occupé plusieurs postes à responsabilité au sein de cet Institut, avant de diriger quatre services clés couvrant la majeure partie du champ de compétences de ce même Institut (valorisation des innovations génétiques, protection intégrée des cultures, agronomie-économie-environnement et valorisation des qualités). L'activité d'Arvalis est tournée vers la recherche appliquée avec pour objectif l'amélioration de la multi-performance des exploitations agricoles de grandes cultures. Acteur de la mise au point et du développement de plusieurs services et outils d'aide à la décision comme Farmstar (systèmes de conseils spatialisés utilisant la télédétection), il a également participé à la mise en place du concept de digifermes qui vise à valoriser les technologies numériques au service des agriculteurs.

BOURDIN Alain



D.R

Alain Bourdin est sociologue et urbaniste, et professeur des universités. Il a été directeur de l'Institut français d'urbanisme et du lab'urba à l'Université de Paris-Est. Il enseigne à l'Université de Louvain (K.U. Leuven) et à l'ESSEC. Il dirige la *Revue internationale d'urbanisme* et le programme POPSU 2. Il a développé une activité de consultant

et participe à l'Atelier Énergie et territoires d'EDF, ainsi qu'à l'observatoire de la ville de Bouygues immobilier. Parmi ses publications, peuvent être citées : « La Question locale », PUF, 2000 ; « La Métropole des individus », Éditions de l'Aube, 2005 ; « L'Urbanisme d'après-crise », Éditions de l'Aube, 2010 ; « Métapolis revisitée », Éditions de l'Aube (dir.), 2014 ; « La Métropole fragile », Éditions du Moniteur, 2015 ; « L'urbanisme des modèles », Éditions de l'Aube (dir.), 2016.

BOURGAIN Gilles



D.R

Ingénieur de l'École Centrale Paris et de la ETSII de Madrid, Gilles Bourgain rejoint le groupe ENGIE en 2000. Il travaille sur le Gaz Naturel Véhicule, d'abord au Mexique, puis à la direction Recherche et technologies. En 2005, il pilote une étude prospective sur l'impact stratégique pour le groupe des politiques de lutte contre le réchauffement climatique. En 2007, il devient coordinateur du consortium de recherche européen EU-DEEP (qui compte 40 partenaires) sur l'intégration de ressources décentralisées d'électricité dans le système électrique européen. En 2010, Gilles Bourgain rejoint l'équipe *Power System Consulting* de *Tractebel Engineering*, qui propose dans le monde entier des services de conseil en matière de planification et d'exploitation des systèmes électriques. Il en prend la direction en 2012. En 2015, il est nommé directeur du département Transition énergétique de Tractebel Engineering. En 2016, il devient directeur adjoint de la stratégie du groupe ENGIE en charge du dialogue stratégique.

CHONÉ Fabien

Directeur général délégué de Direct Energie, Fabien Choné est ancien élève de l'École polytechnique et de l'École nationale des Ponts et Chaussées. Fabien Choné a exercé différentes fonctions durant sept ans chez EDF, au sein de la direction recherche et développement et de la direction de la stratégie.

Il a cofondé Direct Energie en 2003 et en est depuis lors le directeur général délégué.

En tant qu'acteur intégré de l'énergie, Direct Energie assure, outre la production et la fourniture d'électricité et de gaz, la vente de services énergétiques à ses clients. En 2015, le groupe Direct Energie a déjà conquis et fidélisé plus de 1,9 million de sites clients résidentiels et professionnels, aussi bien en France qu'en Belgique.

Fabien Choné est également président de l'Association nationale des opérateurs détaillants en énergie (A.N.O.D.E) et administrateur de l'Union française de l'électricité (UFE).

CLAVREUL Delphine

Delphine Clavreul est analyste des politiques se rattachant au programme sur la gouvernance de l'eau de l'OCDE. Son champ d'expertise couvre un large éventail de ques-



D.R

tions portant sur cette gouvernance, incluant la gouvernance pluri-niveaux, l'engagement des parties prenantes et l'intégrité. Elle participe activement à la coordination de l'Initiative de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau, un réseau pluri-acteurs international. Elle a apporté sa contribution à la rédaction de plusieurs rapports de l'OCDE sur

la gouvernance de l'eau. Delphine Clavreul est titulaire d'un master en géopolitique.

CLINCKX Nicolas

Nicolas Clinckx est Vice-President Energy & Utilities.

CRÉACH Morgane



D.R

Morgane Créach est directrice du Réseau Action Climat France, une fédération qui regroupe 18 associations nationales de protection de l'environnement, un réseau d'experts mobilisés dans la lutte contre les changements climatiques.

Après des études en droit européen et la rédaction d'un mémoire traitant de l'application

du protocole de Kyoto par l'Union européenne, Morgane Créach rejoint en 2005 le Réseau Action Climat-France pour assurer le suivi des négociations européennes (notamment du Paquet énergie climat européen) et internationales sur le climat. Elle est depuis 2011 directrice du Réseau Action Climat.

DEMAILLY Damien

Damien Demailly est diplômé de l'École polytechnique et est docteur en économie. Après une thèse sur l'impact des politiques climatiques sur la compétitivité de l'industrie au CIREC-EHESS, il a travaillé pendant cinq ans dans le milieu de l'écologie associative, puis de l'écologie politique, en France et en Europe. En 2012, il rejoint l'Iddri pour travailler sur les liens entre croissance et environnement, les inégalités environnementales, les indicateurs complémentaires au PIB et les Objectifs du Développement Durable, ainsi que sur les opportunités que représente la révolution numérique en matière de développement durable. Damien Demailly coordonne par ailleurs les programmes d'intervention de l'Iddri.

DERDEVET Michel

Secrétaire général et membre du directoire d'Enedis, Michel Derdevet a occupé différents postes au sein du secteur de l'énergie, dont celui de délégué général adjoint aux affaires communautaires d'EDF, de 1998 à 2000, puis de directeur de la communication et des affaires publiques



D.R

de RTE, de 2000 à 2012. Auparavant, il a été, de 1985 à 1986, puis de 1992 à 1993, chef de cabinet de Martin Malvy au Secrétariat d'État à l'Énergie, puis au ministère chargé des Relations avec le Parlement et au ministère du Budget. Il a occupé les mêmes fonctions auprès de Christian Pierret, ministre de l'Industrie, de 1997 à 1998. Diplômé

d'HEC et titulaire d'un DEA de droit public, Michel Derdevet enseigne à l'Institut d'Études Politiques de Paris et au Collège d'Europe de Bruges. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages, dont « L'Avenir énergétique, cartes sur table » (2012), et en 2015, au Président de la République a remis, un rapport intitulé « Énergie, l'Europe en réseaux ».

DJAHEL Thierry



D.R

Thierry Djahel est directeur du développement et de la prospective au sein de Schneider Electric, le groupe industriel français leader mondial de la gestion de l'énergie.

Il porte un intérêt tout particulier aux questions de transition énergétique et apporte son expertise aux grands maîtres d'ouvrage que sont les collectivités locales et les

acteurs privés de l'immobilier en France. Son expérience des enjeux énergétiques l'a conduit à imaginer et à développer des projets territoriaux autour des *smart grids* et des innovations en lien avec la convergence des technologies de l'énergie et du numérique. Grâce à son savoir-faire et à sa vision en matière de bâtiments intelligents et des territoires à énergie partagée, il contribue activement à la croissance des activités de son groupe dans le déploiement de solutions de production d'énergie renouvelable associées aux applications de Gestion active de l'énergie.

Diplômé de l'École centrale d'électronique et titulaire d'un master en gestion d'entreprise de l'École de Management de Lyon, il a débuté sa carrière dans le domaine de la régulation et des automatismes du bâtiment, puis a dirigé des activités dédiées à l'efficacité énergétique qui ont été à l'origine des premiers contrats de performance énergétique en France.

Administrateur de plusieurs associations professionnelles, il anime de nombreuses conférences et formations dans le cadre de colloques nationaux et internationaux consacrés à des thématiques d'innovation et visant à faire émerger de nouveaux modèles économiques propres à promouvoir et à faire progresser les filières évoluant dans le domaine énergétique, tant au niveau national qu'europpéen.

FARAGGI Paul

Paul Faraggi est manager d'Energy & Utilities Capgemini Consulting.

FAUCHEUX Ivan

Ivan Faucheux est diplômé de l'ENS et de Mines Paritech. Après avoir exercé différentes fonctions dans l'administration préfectorale tout d'abord, puis au sein du ministère de l'Industrie, notamment en tant que chef du bureau de la microélectronique, puis en tant que sous-directeur Transport énergie - Environnement, Ivan Faucheux est, depuis mars 2010, directeur du programme Énergie - Économie circulaire au sein du Commissariat général à l'investissement (CGI), un service rattaché au Premier ministre.

FAUCONNEAU Benoît



Benoît Fauconneau est directeur de recherche à l'INRA - UMR Nutrition et Métabolisme Aquacole, à Saint-Pée sur Nivelle (Pyrénées-Atlantiques). Ingénieur agronome (AgroParisTech), titulaire d'un master en Nutrition (UMPC) et docteur-ingénieur (AgroParisTech), Benoît Fauconneau est spécialiste en biologie et en nutrition des poissons

appliquée à l'aquaculture. Il est l'auteur de plus de 100 publications et de 25 chapitres d'ouvrages. Il a été chef du département INRA Hydrobiologie Faune sauvage, président du centre INRA Bordeaux-Aquitaine et délégué régional. Aujourd'hui, il est secrétaire exécutif de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi).

FLIPO Fabrice



Fabrice Flipo est maître de conférences HDR en philosophie et en épistémologie. Il enseigne à Télécom-EM (Évry) et est chercheur au Laboratoire de changement social et politique (Paris 7 Diderot). Il est l'auteur de nombreux livres et articles sur l'écologie politique et le développement durable (notamment « Nature et politique », 2014 ; « Le Développement durable », Bréal, 2016) et a dirigé deux projets de recherche sur les liens entre l'écologie et le numérique.

D.R

FRANCOU Renaud

Renaud Francou est coordinateur du programme Transitions² qui vise à « relier la transition écologique et la transition numérique ». Il a rejoint la Fondation Internet Nouvelle Génération (FING) en 2003 pour y animer des programmes d'action autour des transformations numériques et portant sur différentes thématiques : l'innovation territoriale, l'identité numérique, la confiance, les *Self Data* ou l'inclusion. Il a également contribué à développer les activités de prospective de la Fing (« Questions numériques ») et favoriser les croisements chercheurs-praticiens (« Connecteur Recherche »).

Il est aussi co-auteur de l'ouvrage « La Confiance numé-

rique » (Fyp Éditions, 2011) et du « Guide de l'innovation centrée-usager » (2014).

GEDDAMUDROV Karl



Karl Geddamudrov est le directeur général d'Opticsvalley, le *cluster* photonique, IOT et *high-tech* de la région Île-de-France. Il est expert en innovation responsable, bio-mimétisme et en création de *spin-off* en « *deep-tech* » et *hardware*. Entrepreneur en Californie et en France, sa double formation stratégie et technologie l'a amené à être directeur chez EY et directeur de pôle de compétitivité.

D.R

GÉHAIN Étienne

Docteur en électrochimie de la Middlesex University (Londres) (1993), Étienne Géhain a travaillé pendant plus de dix ans dans les services de R&D de Gaz de France, notamment sur l'insertion des productions décentralisées d'énergie dans les réseaux électriques (projet EU-DEEP). Après avoir occupé pendant quatre ans les fonctions de responsable du département Support de la direction des ventes Grands comptes de GDF SUEZ, il travaille à nouveau dans le domaine de la R&D, il est en charge des programmes de R&D Corporate d'Engie sur les technologies digitales et de stockage d'énergie. Depuis 2017, il applique ces technologies au développement par « Engie Fab » d'offres commerciales de rupture, notamment dans le domaine des « communautés énergétiques ».

GEOFFRON Patrice



Docteur en économie industrielle, Patrice Geoffron est professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine. Après avoir été vice-président international de Paris-Dauphine, il y dirige l'équipe Énergie-climat qui anime un master (énergie-finances-carbone) et plusieurs chaires de recherche (Économie du climat, marchés européens

D.R

de l'électricité, économie du gaz, *blockchain* climat & énergie). Il s'intéresse plus spécifiquement à la convergence entre l'électricité et les télécommunications dans le cadre de la transition bas-carbone et aux nouvelles organisations, aux nouveaux usages et aux nouveaux modèles économiques émergents : *smart grids*, *smart cities*, stockage... Il est membre du conseil scientifique de *Think Smart Grids*, co-éditeur de la revue *Economics and Policy of Energy and the Environment* et membre du comité scientifique de la *Revue de l'énergie* et de l'*International Journal of Management and Network Economics*.

GIORDANO Vincenzo

Vincenzo Giordano a un master en génie électrique et un PhD en systèmes intelligents (Politecnico di Bari Italy). Il justifie d'une solide expérience dans des projets de recherche aux États-Unis et à Singapour. Il rejoint le groupe ENGIE en 2013, où il est en charge du produit *Smart Energy Systems* dans le département Transition énergétique de Tractebel-ENGIE, qui propose dans le monde entier des services de conseil (analyse technico-économique et réglementaire) en matière de gestion intelligente des ressources énergétiques décentralisés (génération décentralisée, flexibilité de la demande, stockage, véhicules électrique, *microgrids*). Il est en charge de l'Observatoire des technologies digitale d'ENGIE. De 2010 à 2013, il a été officier scientifique au *Joint Research Centre (JRC)* de la Commission européenne, où il était en charge des activités *smart grids*.

JACQ François



D.R

Ancien élève de l'École polytechnique et docteur de Mines-Paris Tech, François Jacq a été chercheur en histoire et sociologie des sciences, puis il a été, entre autres, directeur général de l'Agence nationale de gestion des déchets radioactifs et président de Météo-France. Il est président de l'Ifremer et président de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi).

KAPLAN Daniel

Daniel Kaplan explore le futur sous deux angles : celui de l'innovation ouverte et celui des imaginaires.

En 2000, il a créé la Fondation pour l'Internet Nouvelle Génération (FING), qui « produit et partage des idées neuves et actionnables pour anticiper les transformations numériques ».

Depuis les années 1990, Daniel Kaplan est profondément impliqué dans le développement de l'Internet en France et dans le monde. Au niveau mondial, il a été responsable des adhérents de l'*Internet Society* et a contribué à la création de l'Icann. Depuis 2013, il siège au Conseil national du numérique.

Daniel Kaplan a écrit ou assuré la direction de plus de 25 ouvrages et rapports sur les thèmes de l'Internet, de la mobilité, de l'e-éducation, l'e-inclusion, des villes de demain, du développement durable, de l'identité numérique...

LAIGNEAU Patrick

Patrick Laigneau est ingénieur de l'École nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique de Grenoble (INPG), anthropologue et docteur en sciences de l'environnement d'AgroParisTech. Il a travaillé durant cinq ans en qualité de chargé d'études à l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, puis pendant deux ans en tant que conseiller technique auprès du directeur de l'hydraulique du Burkina-Faso pour le compte du ministère des Affaires étrangères. Il



D.R

LAVERGNE Richard

Ingénieur des mines, Richard Lavergne est en fonction au Conseil général de l'Économie du ministère de l'Économie.

LE GALLIC Thomas



D.R

Ingénieur agronome de formation, Thomas Le Gallic s'est spécialisé dans les politiques de l'énergie et du changement climatique à différentes échelles. Après avoir étudié les politiques énergétiques de vingt villes à travers l'Europe dans le cadre d'un projet mené avec le réseau européen de villes Energy Cities, il a exercé la fonction de consultant

au sein d'ACTeon, un bureau de conseil et de recherche en politique de l'environnement. Pendant quatre ans, il a apporté sa contribution à des travaux d'élaboration et d'évaluation de ce type de politique pour le compte du ministère de l'Écologie, du Commissariat général à l'égalité des territoires, de l'Ademe ou encore de collectivités territoriales. Il a ensuite initié un travail de recherche au sein du Centre de mathématiques appliquées de Mines ParisTech, ayant pour finalité de proposer une approche quantitative des modes de vie pour enrichir les exercices de prospective énergie-climat (un travail réalisé dans le cadre de sa thèse de doctorat qu'il est en train de finaliser).

MAÏZI Nadia



D.R

Professeure et justifiant d'une HDR, Nadia Maïzi est directrice du Centre de mathématiques appliquées de Mines ParisTech. Elle y initie des activités de recherche et d'enseignement liées à la modélisation, à l'optimisation et à l'aide à la décision en matière d'énergie et de climat. Elle développe la prospective en s'appuyant sur des modèles de

la famille TIMES.

En 1999, elle fonde le mastère spécialisé en Optimisation des systèmes énergétiques.

En 2008, elle crée la chaire Modélisation prospective au service du développement durable.

Depuis 2009, elle est la cheffe de la délégation représentant Mines ParisTech dans les Conférences des Parties organisées dans le cadre de l'UNFCCC.

Depuis 2015, elle est membre du comité d'experts pour l'application de la LTECV.

Ingénieure civile de l'École des Mines de Paris (P85) et titulaire d'un doctorat en contrôle (1992) de l'EMP, elle a effectué en 1994 un séjour post doctoral à l'Université de Stanford. Elle est chevalier des Palmes académiques, chevalier de l'Ordre national du Mérite et chevalier de la Légion d'honneur.

MEHEUT Guillaume



Guillaume Meheut est ingénieur en chef du corps des Mines. Après une formation à l'École polytechnique, puis à Télécom ParisTech, il travaille de 2008 à 2014 pour l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes, plus particulièrement sur l'interconnexion des réseaux mobiles et le développement des réseaux fixes à très haut débit en

D.R

fibre optique. En 2014, il rejoint la direction générale de l'énergie et du climat, en tant que directeur de cabinet. Il est en charge des questions de coordination interne et du suivi de la R&D et de l'innovation, en particulier à travers le programme des investissements d'avenir.

MICHEL Laurent



Ingénieur général des mines, Laurent Michel a exercé de 1991 à 2003 des fonctions diverses dans les DRIRE (directions régionales de l'industrie, de la recherche et de l'environnement) et les écoles des mines du ministère de l'Industrie, avant d'être nommé directeur de la DRIRE Midi-Pyrénées de 2003 à 2006.

D.R

En juillet 2006, il est nommé directeur de la prévention des pollutions et des risques au ministère de l'Écologie, avant d'en être le directeur général de la prévention des risques en 2008. Depuis janvier 2013, il est directeur général de l'énergie et du climat au ministère de la Transition écologique et solidaire.

MONNOYER-SMITH Laurence



Titulaire d'un doctorat en sciences de l'information et de la communication de l'Université de Toulouse Le Mirail, d'un DEA en sciences de l'information et de la communication CELSA Paris IV et d'une habilitation à diriger des recherches, obtenue à l'Université

D.R

Toulouse 1, Laurence Monnoyer-Smith a été maîtresse de

conférences pendant huit ans, puis a exercé en qualité de professeur d'université à l'Université de technologie de Compiègne de 2008 à 2013.

En parallèle, entre 2001 et 2013, Laurence Monnoyer-Smith sera successivement directrice du laboratoire Costech, responsable des enseignements en sciences de l'information et de la communication et enseignante ingénieur dans les domaines de la culture scientifique et technique, du débat public et de la communication scientifique. Ses travaux de recherche portent sur la démocratie électronique, les dispositifs électroniques de médiation citoyenne, les données publiques et la culture numérique, et les nouvelles formes de citoyenneté.

En 2013, elle est nommée vice-présidente de la Commission nationale du débat public et, à ce titre, contribue activement au développement des outils de démocratie représentative et participative.

Laurence Monnoyer-Smith a été nommée en Conseil des Ministres, le 22 mai 2015, Déléguée interministérielle et Commissaire générale au Développement durable au Commissariat général au Développement durable du ministère de la Transition écologique et solidaire.

MOREAU Sylvain

Sylvain Moreau est chef du service de la donnée et des études statistiques (SDES) au Commissariat général du Développement durable (CGDD), ministère de la Transition écologique et solidaire.

MORILHAT Patrick



Patrick Morilhat a commencé sa carrière à EDF en 1985, où il a occupé successivement les fonctions de chef de projet et de responsable d'un département de recherche. Dans le domaine technique, il a développé l'utilisation d'approches probabilistes dans le domaine de la mécanique des structures et a mis en place des systèmes de

D.R

surveillance dans des centrales nucléaires et thermiques. À partir de 2002, il a été chargé du développement de partenariats internationaux portant sur la R&D en matière de production d'électricité et a, dans ce cadre, conduit de nombreux projets de recherche internationaux en liaison avec des sociétés leader du secteur de l'électricité. Depuis 2009, il est responsable du programme de R&D d'EDF sur les performances des centrales nucléaires : des activités de recherche à forte connotation numérique qui portent sur l'amélioration des procédés, la modernisation du contrôle-commande et des moyens de conduite, et sur la productivité des chantiers de maintenance. Patrick Morilhat est vice-président de l'I&C *Committee* de l'EPRI (*Electric Power Research Institute*).

REINAUD Julia

Julia Reinaud est Director at i24C.



ROUÏL Laurence

Laurence Rouïl est responsable du pôle Modélisation environnementale et décision à l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Docteur en mathématiques de l'Université de Bordeaux 1, elle intègre l'Ineris en 1998, où elle développe ses compétences dans le domaine de

D.R

la qualité de l'air et des pollutions environnementales. En 2003, elle pilote notamment la mise en place, en partenariat avec Météo France, le CNRS et l'Ademe, de PREV'AIR, le système national de prévision et de cartographie de la qualité de l'air (www.prevoir.org), qui est la première plateforme opérationnelle de ce type en Europe. Elle conduit de nombreux projets d'étude et de recherche pour le compte du ministère en charge de l'Environnement dans les domaines de la surveillance de la qualité de l'air et de l'évaluation de politiques de gestion. L'équipe qu'elle dirige participe également aux travaux du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, une entité française faisant référence en matière de mise en œuvre de la réglementation relative à la qualité de l'air et à la coordination technique du dispositif de surveillance correspondant. Au niveau européen, elle est nommée en 2014 présidente du programme international de surveillance de l'EMEP, qui sert de support aux travaux de surveillance de l'application de la Convention sur le transport des polluants atmosphériques à longue distance de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (www.clrtap.int), elle a auparavant assuré le pilotage des travaux de l'équipe spéciale Mesures et modélisation de ce même programme pendant six ans. Elle préside la commission Énergie et environnement du Conseil supérieur de la météorologie. Elle est, depuis 2010, membre de l'ACNUSA, l'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires au titre de ses compétences dans le domaine de la qualité de l'air.

SAINTES Philippe

Ingénieur civil de l'Université Catholique de Louvain (Belgique), Philippe Saintes a rejoint Tractebel Engineering en 1988, où il a contribué et dirigé de nombreuses études sectorielles et schémas directeurs au grand international, dans les domaines de l'électricité et du gaz. Il a ensuite intégré la branche internationale du groupe ENGIE en 2001 pour y développer l'analyse des marchés industriels nouvellement ouverts, en électricité et en gaz, au Brésil et au Pérou. De retour en Belgique, il rejoint le CEEME, le centre d'expertise du groupe en études économiques et modélisation, où il dirige les études menées en support des projets internationaux. Il a pris en charge en 2009 les études économiques de la branche Énergie International, avant d'intégrer, en 2016, la direction de la stratégie du groupe, où il est en charge des études prospectives dans le domaine de l'électricité.

SAUJOT Mathieu

Mathieu Saujot est coordinateur du programme Transition numérique et écologique à l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri). Ingénieur et docteur en économie, Mathieu Saujot mène depuis 2010

des travaux de recherche à l'Iddri portant sur un ensemble de thématiques reliant la ville et la transition écologique : la transition vers des villes bas-carbone et la modélisation urbaine ; les politiques de lutte contre la précarité énergétique (en matière de logement et de mobilité) et les politiques de logement intermédiaire ; l'analyse des liens entre modes de vie et systèmes techniques dans le projet de ville durable ; les enjeux de planification urbaine. Récemment, il a développé une série de travaux sur la ville numérique, dans lesquels il analyse les enjeux des données dans la ville « intelligente » et les promesses que suscitent les outils de *crowdsourcing* urbain. Il porte aujourd'hui avec la Fing le projet Audacities sur la gouvernance de la ville numérique réelle.

SCHMITT Jérôme

Senior vice-président Innovation & Energy Efficiency, Jérôme Schmitt a débuté sa carrière en Asie, avant de rejoindre le groupe en 1992, pour



D.R

exercer au sein de la direction Financière Holding. D'abord en charge des opérations financières de la zone Asie/Afrique du Nord, puis de la zone Amérique du Sud pour les projets d'exploration et de production, il a poursuivi sa carrière dans la branche Amont. Il devient alors responsable Affaires nouvelles dans le domaine de l'aval gaz, d'abord sur la zone Moyen-Orient-Asie Centrale, puis en Inde. Il est alors basé à Mumbai. À partir de 2000, il est nommé responsable Fusions & Acquisitions corporate au sein de la direction des Fusions & Acquisitions. Il devient directeur de la communication financière en 2004. En 2009, il est nommé trésorier et directeur du financement du groupe, puis il se voit confier la responsabilité du Secrétariat général de la branche Marketing & Services. Il occupe le poste de directeur du développement durable et de l'environnement de Total de 2013 à 2016, avant d'être nommé, le 1^{er} septembre 2016, directeur de l'innovation et de l'efficacité énergétique de la nouvelle branche Gas, Renewable and Power. Il est ingénieur civil des mines (S.E.).

SERVEILLE Hélène

Ingénieur des mines, Hélène Serveille est en fonction au Conseil général de l'Économie du ministère de l'Économie.

WEISS Maxime

Diplômé de l'École supérieure de commerce KEDGE Business School, Maxime Weiss a travaillé chez SFR pendant un an sur le développement *marketing* d'offres TV&VOD pour mobile. En 2011, il rejoint le groupe ENGIE pour exercer au sein de la direction Marketing de la BU France BtoC en qualité de chef de projet : il y développe le mix canal de vente et de nouveaux produits et services à destination du marché résidentiel français. Depuis 2014, Maxime Weiss a rejoint la direction de la Stratégie du groupe, où il contribue au pilotage du dialogue stratégique avec les entités opérationnelles et à la conduite d'études transverses.

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

Patients et praticiens de terrain, acteurs de l'innovation de santé

Avant-propos - Robert PICARD

Conduire des projets collaboratifs en santé

Retour d'expérience sur une démarche de coconception
Cédric ROUTIER, Agnès D'ARRIPE et Stéphane SOYEZ

Le co-design en continu : un facteur clé de la réussite de la prise en charge des patients dans leur parcours de soins
Agnès CAILLETTE-BEAUDOIN et Arnault THOURET

Le rôle des patients et de leurs associations représentatives dans l'innovation en santé : représentations et transformations réelles
Caroline GUILLOT

L'enjeu de l'implication du patient dans la conception de solutions connectées pour la maîtrise de l'adhésion aux traitements
Sylvie ARNAVIELHE et Virginie DELAY



Mobiliser les sciences humaines et sociales et les technologies pour appréhender les nouveaux usages

Santé et handicap : d'une conception centrée « utilisateur » à la conception universelle
Véronique LESPINET-NAJIB, Amélie ROCHE et Quentin CHIBAUDEL

L'aménagement de l'espace dans les établissements de santé : une expérience d'innovation sociale hospitalière
Barbara BAY et Christelle CARRIER

De la domestication des technologies
Myriam LEWKOWICZ

Living-Lab en santé et autonomie : de la procédure au processus, de l'innovation à l'énoation
Sophie MARTIN, Denis BROUILLET et Gérard DRAY

E-santé et prévention santé : quelle évaluation pour quels types d'intervention ?
Olivier AROMATARIO

L'importance de la mesure de la qualité en matière d'imagerie médicale
Jean-Marie MOUREAUX

L'évaluation des usages et des comportements en univers immersifs : quelques enjeux actuels
Guillaume JÉGOU et Nico PALLAMIN

Recherche-intervention et Living Labs, une même lignée de « recherches immersives » ?
Mathias BÉJEAN et Jean-Claude MOISDON

L'innovation participative en santé : quelles politiques publiques ?

La participation des citoyens à la décision en matière de santé et sur leur propre santé : enjeux, pièges, risques et innovations
Yves CHARPAK

La santé en chair et en nombres
Gérard DUBEY

Les Living Labs, ces leviers d'innovation en santé publique
Valentin BERTHOU et Robert PICARD

Un accélérateur de l'innovation en santé : le Lab Santé Île-de-France®
Christine CALINAUD et le Pr. Jean-François DHAINAUT

Les perspectives d'une politique d'innovation en santé
Jean-Yves FAGON

Mai 2017

La santé, élément commun des politiques publiques ? L'expérience canadienne
Eva KEHAYIA, Sara AHMED, Philippe ARCHAMBAULT, Joyce FUNG, Anouk LAMONTAGNE, Bonnie SWAINE, Dahlia KAIRY, Guylaine LE DORZE, Hélène LEFEBVRE, Tiiu POLDMA et Delphine LABBÉ

HORS DOSSIER

Aspects politiques et culturels des utopies d'aujourd'hui
Philippe J. BERNARD et Alexandre ROJEY

Ce numéro est coordonné par Robert PICARD

Pour plus d'information, nous invitons le lecteur à se reporter sur notre site :
<http://www.anales.org>