



Integration of electromobility with the electric power systems: The key challenges

Yannick Perez, Wale Arowolo

► To cite this version:

Yannick Perez, Wale Arowolo. Integration of electromobility with the electric power systems: The key challenges. Annales des Mines - Enjeux Numériques, 2021. <hal-03363799>

HAL Id: hal-03363799

<https://hal.science/hal-03363799v1>

Submitted on 4 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Enjeux numériques



Le numérique et la refondation du système électrique

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES
FONDÉES EN 1794

N° 15 - SEPTEMBRE 2021

*Publiées avec le soutien
de l'Institut MinesTélécom*

UNE SÉRIE DES
**ANNALES
DES MINES**
FONDEES EN 1794

ENJEUX NUMÉRIQUES

Série trimestrielle • N°15 - Septembre 2021

Rédaction

Conseil général de l'Économie,
ministère de l'Économie, des Finances et de
la Relance
120, rue de Bercy - Télédéc 797
75572 PARIS Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

François Valérian

Rédacteur en chef

Gérard Comby

Secrétaire général

Alexia Kappelmann

Secrétaire générale adjointe

Magali Gimon

Assistante de rédaction

Myriam Michaux

Webmestre et maquettiste

Membres du Comité de rédaction

Jean-Pierre Dardayrol

Président du Comité de rédaction

Edmond Baranes

Godefroy Beauvallet

Côme Berbain

Pierre Bonis

Serge Catoire

Michel Cosnard

Arnaud de La Fortelle

Caroline Le Boucher

Alban de Nervaux

Bertrand Pailhès

Grégoire Postel-Vinay

Jacques Serris

Hélène Serveille

Laurent Toutain

Françoise Trassoudaine

François Valérian

Photo de couverture :

Alexej von Jawlensky (1864-1941), *Symphony
en Rose*, huile sur toile, 1929. Stadelches
Kunstinstitut, Francfort sur le Main.
Photo © Gordon Robertson Photography
Archive/ BRIDGEMAN IMAGES

Iconographie

Christine de Coninck

Abonnements et ventes

COM & COM

Bâtiment Copernic - 20, avenue Édouard-
Herriot

92350 LE PLESSIS-ROBINSON

Sébastien Rodriguez

Tél. : 01 40 94 22 22 - Fax : 01 40 94 22 32
s.rodriguez@cometcom.fr

Mise en page : Nadine Namer

Impression : EspaceGrafic

N° ISSN 2781-1263

Éditeur délégué

FFE – 15, rue des Sablons - 75116 PARIS
www.ffe.fr

Régie publicitaire : Belvédère Com

Fabrication : Yaël Sibony

Yaël.Sibony@belvederecom.fr

Tél. : 01 53 36 20 46

Directeur de la publicité : Bruno Slama

Tél. : 01 40 09 66 17

bruno.slama@belvederecom.fr

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

Le numérique et la refondation du système électrique

- 04 Introduction
Edmond BARANES
- 06 Le numérique au service de la modernisation des réseaux d'électricité
Jacques PERCEBOIS
- 12 Les enjeux réglementaires du numérique dans les systèmes électriques
Ivan FAUCHEUX
- 19 Les enjeux technologiques et industriels du numérique dans les réseaux électriques
Michel MORVAN
- 25 L'intégration des équipements numériques dans les systèmes électriques : quelques enjeux de politique publique pour l'Europe
Patrice GEOFFRON
- 32 Le *cluster* 5 d'Horizon Europe au cœur des problématiques des systèmes énergétiques
Annabelle RONDAUD
- 37 Green energy pricing for digital Europe
Claude CRAMPES et Yassine LEFOUILI
- 42 Les plateformes numériques d'échange d'électricité
Thomas CORTADE et Jean-Christophe POUDOU
- 48 L'effacement diffus, métier numérique associant les consommateurs à la transition écologique
Pierre BIVAS
- 54 Le numérique, facteur de succès de la mobilité électrique
Jean-Rémy GAD et Marc MOREAU

- 61** Integration of electromobility with the electric power systems: The key challenges
Yannick PEREZ et Wale AROWOLO
- 67** La transition vers l'électricité pour des milliers de bus à la RATP : la puissance du numérique au service d'un projet titanesque
Agathe BASTIT et Felix von PECHMANN
- 74** Suivre ses kilowattheures sur le compteur communicant d'électricité ?
Une enquête sur les pratiques ordinaires de comptage domestique
Aude DANIELI
- 84** L'optimisation de la consommation électrique d'un *cloud provider*
Aurélien TANIÈRE
- 89** Coévolution des systèmes électriques et informatiques du Groupe EDF depuis vingt ans
Vincent NIEBEL

HORS DOSSIER

- 94** Intelligence artificielle et Management des ressources humaines : pratiques d'entreprises
Françoise CHEVALIER et Cécile DEJOUX
(Article rattaché au N° 12, décembre 2020, « Intelligences artificielles et humaines, quelles interactions ? »)
- 106** L'utilisation de l'IA dans la gestion de la crise sanitaire
Félicien VALLET et Bertrand PAILHÈS
(Article rattaché au N° 14, juin 2021, « Réponses numériques à la crise sanitaire »)
- 113** Résumés
- 118** Abstracts
- 123** Contributeurs

Ce numéro a été coordonné par Edmond BARANES

Introduction

Par **Edmond BARANES**

Montpellier Recherche en Économie (MRE), Université de Montpellier

Le secteur énergétique est révolutionné par le développement des technologies numériques. La numérisation de ce secteur s'est fortement accélérée ces dernières années. Le numérique transforme la manière dont l'énergie est produite en même temps qu'il marque fortement sa consommation. Les enjeux sont considérables, surtout dans un contexte où le secteur de l'énergie est confronté à la transition énergétique. Si le numérique est indéniablement un des outils à privilégier dans la lutte contre le changement climatique, la question de son impact environnemental agite aussi régulièrement le débat public, avec au centre des discussions la neutralité carbone des *data centers* et les efforts déployés en matière d'éco-conception des services numériques.

C'est notamment pour l'électricité que les technologies numériques produisent les changements les plus remarquables. Les systèmes électriques sont en effet considérablement bouleversés par le numérique. Les transformations sont multiples et modifient en profondeur l'organisation et la gestion des réseaux. Les changements les plus notables sont certainement ceux liés à l'émergence des *smart grids*. Ces réseaux intelligents qui intègrent de nombreuses technologies numériques sont une caractéristique forte des mutations en cours. Ils apparaissent aujourd'hui comme des outils incontournables pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique et atteindre les objectifs fixés en matière de décarbonisation. Le numérique apparaît donc comme un facilitateur de la transition énergétique. Les initiatives et politiques publiques récentes montrent combien les opportunités sont grandes. Le *cluster 5* « climat, énergie, mobilité » du programme Horizon Europe est une illustration forte de la volonté d'orienter les innovations vers de nouveaux modèles énergétiques s'appuyant sur le numérique.

Les enjeux de la numérisation des systèmes électriques sont nombreux. Tout d'abord, les technologies numériques permettent aux gestionnaires de réseaux d'améliorer leur efficacité. Des outils numériques bien intégrés aux réseaux existants favorisent une meilleure optimisation des réseaux traditionnels. C'est le cas des innovations techniques qui, en reposant sur la production et l'exploitation des données, offrent une flexibilité accrue et améliorent ainsi les mécanismes d'équilibrage. Il en va ainsi, par exemple, des capteurs et autres solutions innovantes déployés par les gestionnaires de réseaux pour contrôler l'état de leurs installations et développer la maintenance prédictive. C'est aussi le cas des jumeaux numériques, qui sont amenés à jouer un rôle important dans l'optimisation des systèmes. D'autres équipements, comme les compteurs électriques et diverses solutions numériques, contribuent aussi à améliorer l'efficacité des systèmes en aidant à mieux mesurer la consommation énergétique et à modifier les comportements des consommateurs finals. Devant ces évolutions, la régulation de l'électricité doit s'adapter pour faire face aux nouveaux enjeux liés notamment à l'émergence de nouveaux modèles économiques chez les acteurs traditionnels. Avec la numérisation des systèmes électriques, le régulateur dispose aussi d'une masse de données importante qui offre des possibilités pour améliorer l'efficacité de la régulation de l'électricité.

Au-delà de la modernisation des réseaux électriques, l'intégration des technologies numériques dans les systèmes électriques ouvre des perspectives intéressantes dans le cadre de la transition énergétique, en facilitant l'intégration des énergies renouvelables et en favorisant le développement de nouveaux usages comme ceux de la mobilité électrique. Les réseaux intelligents facilitent ainsi l'insertion des énergies intermittentes dans les réseaux, et une meilleure organisation et gestion

des productions décentralisées d'électricité. Le consommateur devient acteur du système, il peut produire sa propre énergie, l'autoconsommer ou la revendre. La capacité du « consomm'acteur » à piloter sa consommation d'électricité se traduit par une interdépendance entre la consommation et la production dans laquelle la consommation peut s'adapter à la production. La logique traditionnelle de l'équilibre du réseau est alors modifiée, on assiste à une décentralisation des systèmes, et le foisonnement des innovations numériques devrait permettre d'améliorer d'autant plus l'efficacité des systèmes électriques. Des micro-réseaux électriques (*microgrids*) se constituent, qui permettent d'agréger des installations de production et de consommation locales, et peuvent ou non être raccordés au réseau de distribution. Les modèles économiques qui accompagnent le développement de ces micro-réseaux prennent des formes diverses. Ils s'appuient généralement sur des plateformes qui organisent les échanges d'électricité en intégrant les technologies numériques les plus récentes, et plus particulièrement la technologie *blockchain* et l'intelligence artificielle.

Ces évolutions répondent aux exigences de la transition énergétique, elles répondent aussi à la demande d'une autonomie accrue des territoires en matière de politique énergétique. S'il est indéniable que les technologies numériques organisent un changement profond des systèmes électriques, il n'en demeure pas moins que la technologie ne fait rien sans l'appropriation et le consentement des usagers. Or, la réussite de la révolution numérique des systèmes électriques repose sur la production et l'exploitation des données. Cela pose alors de manière accrue la question de la protection des données et du respect de la vie privée. La sécurité des systèmes est aussi un enjeu important, surtout dans un contexte de cybermenaces en forte évolution, et face à l'intensification de la production et de l'exploitation des données au sein des systèmes électriques.

Ce numéro d'*Enjeux numériques* présente des articles permettant de nourrir la réflexion sur des questions posées par la numérisation des systèmes électriques. Les premières contributions abordent les enjeux de la numérisation sous différents aspects : économiques et réglementaires, technologiques, environnementaux et de politiques publiques. Les articles qui suivent abordent des questions plus spécifiques parmi lesquelles celles relatives aux nouveaux modèles économiques, aux nouveaux acteurs et métiers émergents, ou encore à la mobilité électrique.

Très bonne lecture !

Le numérique au service de la modernisation des réseaux d'électricité

Par Jacques PERCEBOIS

Professeur émérite à l'Université de Montpellier, chercheur à l'UMR CNRS Art-Dev

Le numérique consommerait chaque année près de 3 000 TWh (térawatt-heures) à l'échelle mondiale selon une étude de l'association The Shift Project (2018), soit environ 11 à 12 % de la consommation mondiale d'électricité. Cela correspond *grosso modo* à l'équivalent de la consommation d'électricité de l'Union européenne des 27 en 2019. La production des équipements numériques représenterait environ 45 % de ces besoins. La consommation des usages, qui correspond au solde soit 55 %, se répartirait comme suit : 19 % pour les équipements terminaux, 20 % pour les *data centers* et 16 % pour le fonctionnement des réseaux. Mais, en retour, les réseaux d'électricité, de transport comme de distribution, bénéficient aussi des progrès du numérique, que ce soit au niveau de l'équilibrage des réseaux ou à celui de l'intégration des renouvelables.

Le numérique consomme de l'électricité, mais il est aussi un outil entre les mains des électriciens, et pas seulement des gestionnaires de réseaux. Les producteurs d'électricité utilisent de plus en plus la technique du « jumeau numérique » (*digital twin*) lors de la construction d'une centrale. Elle permet de mener des simulations numériques, ce qui facilite ensuite la mise au point de la version physique du projet. L'utilisateur du logiciel peut par exemple se déplacer de façon virtuelle à l'intérieur du bâtiment du réacteur d'une centrale nucléaire, pour repérer des défauts ou préparer une intervention physique. Les robots téléguidés par des programmes numériques relevant de l'intelligence artificielle peuvent remplir des tâches que les humains auraient des difficultés à assumer, telles les interventions en zone nucléaire irradiée ou la manipulation de déchets radioactifs.

La décarbonation croissante du mix électrique s'accompagne d'une pénétration accrue des renouvelables intermittentes comme le solaire et l'éolien, et ces énergies, du fait de leur caractère non pilotable, vont accroître les contraintes au niveau de la gestion des réseaux. La quantité de kWh injectée en amont sur le réseau doit en temps réel être strictement égale à la quantité soutirée en aval du réseau, aux pertes en ligne près. Ce sont les lois de la physique. Le numérique est un outil qui facilite à la fois l'équilibrage des réseaux et l'intégration des renouvelables décentralisées sur ces réseaux.

Le numérique au service de l'équilibrage des réseaux d'électricité

Le réseau d'électricité transporte en haute tension l'électricité produite par les centrales réparties sur le territoire, et le courant est ensuite distribué localement en basse tension au consommateur final professionnel ou domestique. L'interconnexion des réseaux au niveau national comme au niveau européen permet de bénéficier du « foisonnement » des puissances. Le « foisonnement » traduit le fait que, en raison de comportements différenciés des consommateurs, la puissance maximale appelée sur le réseau est, à un instant donné, sensiblement inférieure à la somme des puissances maximales souscrites par chaque consommateur. Il n'en reste pas moins vrai qu'il faut garantir l'équilibre du réseau, c'est-à-dire maintenir en permanence la fréquence à 50 Hz. Si la quantité d'électricité soutirée est inférieure à la quantité injectée, la fréquence augmente ; dans le

cas contraire, elle chute, et dans tous les cas on risque le *black-out*. Le gestionnaire du réseau de transport (RTE en France) doit adapter l'offre à la demande d'électricité, et il dispose pour cela de plusieurs moyens dont l'efficacité est aujourd'hui renforcée grâce au numérique.

Les moyens traditionnels d'équilibrage

Ils sont de plusieurs sortes, et le gestionnaire de réseau joue à la fois sur la puissance disponible et sur la puissance appelée.

Les réserves de puissance

Pour faire face à toute augmentation ou baisse non anticipée de la demande d'électricité, le gestionnaire de réseau peut compter sur l'appel de réserves primaire, secondaire et tertiaire. La réserve primaire est activable automatiquement en moins de 30 secondes en cas de déséquilibre entre l'offre et la demande. L'activation de la réserve secondaire permet de rétablir la stabilité de la fréquence, de façon elle aussi automatique, et intervient dans les 15 minutes. Au-delà, il faut faire appel à une réserve tertiaire, qui est en général contractualisée avec les producteurs sous forme d'appels d'offres (OIE, 2017).

La tarification incitative

La tarification optimale de l'électricité se fait sur la base des coûts marginaux. Les centrales sont appelées sur le réseau en fonction de leur coût marginal de production, en commençant par les moins coûteuses. Aux heures de pointe, le prix est donc plus élevé, ce qui incite les consommateurs qui le peuvent à reporter leur consommation. Une bonne tarification permet donc d'écarter les pointes, et indirectement d'économiser des investissements puisque la puissance à installer sera moindre (Percebois, 2019).

L'effacement contractuel

Les fournisseurs disposent en général d'un portefeuille de clients contractuellement effaçables, et ils peuvent d'ailleurs comptabiliser la puissance correspondante dans leurs engagements de capacité. Tous les fournisseurs doivent en effet garantir au gestionnaire du réseau de transport (RTE) qu'ils disposent de capacités suffisantes pour faire face à la demande de leurs clients, en particulier en période de pointe, et cela peut se faire en produisant ou en acquérant des certificats de capacité, ou en prouvant qu'ils pourront, en cas de nécessité, effacer une partie de la demande à fournir.

Le stockage

Il existe quelques moyens de stocker l'électricité même si cela n'est pas possible à grande échelle dans des conditions économiques. On peut compter sur les barrages de retenue et sur les stations de pompage (STEP pour station de transfert d'énergie par pompage). À défaut de stocker l'électricité, on stocke l'eau destinée à la produire. On peut aussi faire appel au stockage par batteries, mais cela n'est possible pour l'instant que pour de petites quantités et de faibles durées, et c'est au demeurant fort coûteux. L'électrolyse de l'eau permet de produire de l'hydrogène qui, directement *via* la pile à combustible, ou indirectement *via* la « méthanation » (production de méthane en combinant de l'hydrogène et du CO₂), peut ensuite servir à produire de l'électricité. Mais ces procédés sont encore largement embryonnaires et coûteux.

Les importations

Si l'offre nationale est insuffisante, l'interconnexion transnationale des réseaux de transport permet de faire appel aux importations programmées ou à « bien plaire » (négociées en temps réel sur le marché). Certains incidents (comme celui de 2006 en Allemagne avec l'effondrement de lignes à haute tension) ont montré que le secours mutuel entre réseaux européens permettait d'éviter le *black-out* général sur la « plaque » européenne.

Le délestage

C'est la solution de dernier recours à laquelle le gestionnaire de réseau fait appel. Il s'agit de couper la consommation de certains clients afin de préserver celle du plus grand nombre et d'éviter le *black-out*. Ce plan de délestage doit néanmoins être validé par les pouvoirs publics.

L'apport du numérique aux mécanismes d'équilibrage

Le numérique facilite la réactivité et la précision des décisions, dans trois domaines tout particulièrement : la tarification, l'effacement et le stockage.

Le numérique permet de proposer une tarification en temps réel fondée sur le prix du marché de gros

Grâce à un compteur dit « intelligent », ou plus précisément « communicant », ou simplement *via* une application téléchargeable sur un téléphone portable, le consommateur peut être informé en continu de l'évolution du prix de l'électricité et modifier son comportement en conséquence. C'est évidemment vrai pour les professionnels, mais cela peut également concerner les particuliers. On parle dans ce cas de *real-time pricing*. La tarification dite « dynamique », qui doit se développer au vu des directives, permet de lier le prix payé par le client au prix observé heure par heure sur le marché de gros. Le consommateur final peut, avec les nouveaux compteurs, bénéficier d'un dispositif de pilotage automatique de ses équipements connectés ; cela permet d'optimiser la connexion en fonction des signaux-prix envoyés par le fournisseur.

Le numérique permet de valoriser l'effacement diffus

En réduisant simultanément l'appel de puissance, même modeste, de milliers de consommateurs, on économise un volume important d'énergie soutirée, ce qui peut permettre de passer plus facilement la pointe. Cette solution est déjà en vigueur dans des régions qui connaissent des difficultés, du fait soit d'une production locale insuffisante (la Bretagne), soit d'une capacité de transport limitée (la région PACA). Sur un signal de RTE, l'application Ecowatt incite le consommateur final à adopter un comportement citoyen en réduisant un peu son appel de puissance. Une étape supplémentaire est atteinte avec la mise en place d'« agrégateurs » d'effacement. Ces « agrégateurs » sont des acteurs spécialisés qui regroupent les capacités d'effacement auprès d'une multiplicité de consommateurs finals (ménages et professionnels), afin de les valoriser sur le marché dit de capacité ou directement auprès du gestionnaire de réseau RTE. Par agrégation, on peut créer l'équivalent de « centrales électriques virtuelles » (VPP pour *Virtual Power Plant*). Le fonctionnement d'une telle centrale virtuelle repose sur la mise en place d'une plateforme digitale permettant d'optimiser la gestion des capacités en fonction notamment des prix du marché *spot* (voir la note de PwC, 2018). On estime que cette capacité peut aller aujourd'hui jusqu'à 3 GW alors que la pointe en France dépasse rarement 90 GW. Mais 3 GW, c'est déjà l'équivalent de trois réacteurs nucléaires. Le potentiel sera demain nettement plus élevé (10 GW, voire davantage).

Le numérique facilitera également le stockage-déstockage de l'électricité des véhicules électriques

Au fur et à mesure que la part de la mobilité électrique augmentera, le gestionnaire du réseau pourra faire appel aux batteries des véhicules comme moyen de stockage de court terme. Comme le rappellent Beeker et Hauet (2019), le pilotage de la recharge des véhicules électriques permettra aussi de contenir l'augmentation du besoin de puissance lié au développement de la mobilité électrique. Il faut éviter que tous les véhicules se rechargent en même temps, surtout s'ils optent pour une charge rapide qui appelle beaucoup de puissance.

Le numérique au service de l'injection des renouvelables intermittentes et décentralisées

Le numérique peut constituer une aide dans trois directions : la gestion de l'intermittence, le renforcement des interactions entre réseaux de transport et de distribution, l'absence de réseaux interconnectés.

Gestion de l'intermittence

Il existe deux types de centrales électriques : des centrales dites « pilotables » qui adaptent leur production à la volatilité de la demande ; et des centrales dites « non pilotables » qui produisent en fonction de la disponibilité de la ressource, le vent et le soleil, donc indépendamment de la demande. Les centrales nucléaires et l'hydraulique de barrage sont des sources de production décarbonées et pilotables. Les centrales solaires et éoliennes, ainsi que l'hydraulique au fil de l'eau, sont décarbonées, mais non pilotables. Les centrales à gaz ou au charbon sont pilotables, mais carbonées. Un système électrique a un besoin minimum de puissance pilotable, sauf à disposer d'une capacité de stockage considérable.

Le faible facteur de charge des renouvelables par rapport aux centrales pilotables (15 à 20 % pour le solaire et 25 à 30 % pour l'éolien, contre 80 % pour le nucléaire) et leur implantation décentralisée, qui réduit le foisonnement, imposent d'installer des surcapacités en renouvelables ; de plus, ce sont les centrales pilotables qui servent de *back-up* et qui sont *de facto* victimes d'un « effet d'éviction ». En Allemagne, la puissance installée en GW est disproportionnée par rapport à la production en TWh, comparativement à la France ; c'est dû à la part élevée des renouvelables dans le mix électrique, et cela se répercute bien évidemment sur le prix payé par le consommateur final (se reporter au tableau ci-après).

Année 2019	Production TWh	Puissance GW	Puissance intermittente GW	CO ₂ émis MtCO ₂ eq.	Prix du kWh Centimes d'euro
Allemagne	604	215	116	805	30,4
France	537	135	26	19	17,5
Ratio Allemagne/France	1,1	1,6	4,5	42,4	1,7

Source : auteur (site PNC)

Le développement massif des renouvelables pose un autre problème au niveau de la stabilité de la fréquence du réseau interconnecté. Contrairement aux alternateurs des centrales pilotables qui se synchronisent de façon autonome, les onduleurs actuels des renouvelables doivent être pilotés, et il faut pour cela utiliser des applications numériques faisant appel à de l'intelligence artificielle, afin de coordonner des milliers de points d'injection et de soutirage (pilotage dit en *grid forming*) (Sapy, 2021). La coordination d'une multitude de sources intermittentes de faible puissance est beaucoup plus complexe que celle d'un petit nombre de sources de forte puissance, et cela sera de plus en plus difficile à réaliser sans le numérique, au fur et à mesure que la part des renouvelables augmentera. Les réseaux « intelligents » couplés à des compteurs communicants permettent ainsi d'optimiser l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité.

Les interfaces entre réseaux

La production décentralisée d'électricité permet à des citoyens de recourir à l'autoconsommation et de se regrouper au sein de *microgrids* de dimensions variables, interconnectés ou non d'ailleurs au réseau national. Le consommateur peut installer des panneaux solaires sur le toit de sa maison, consommer en temps réel une partie de cette production d'électricité, revendre le reste au réseau ou à ses voisins, voire choisir de le stocker à l'aide de batteries ou sous forme d'hydrogène ; il pourra quelques heures ou quelques jours plus tard faire appel à une pile à combustible pour produire à nouveau de l'électricité à partir de l'hydrogène. Les échanges à l'échelle d'un quartier ou d'un village permettent de profiter d'un certain foisonnement des puissances, et la gestion de la production des divers sites se fait alors *via* des *blockchains*.

L'essentiel (environ 90 %) de la production des renouvelables est aujourd'hui injecté sur le réseau de distribution (Enedis), à la différence de la production centralisée qui demeure injectée sur le réseau de transport. Le système électrique actuel obéit largement à une logique unidirectionnelle, de la production en haute tension vers la consommation en basse tension. Le réseau électrique du futur sera fondé sur une logique bidirectionnelle. Il faudra de plus en plus « remonter » de l'électricité produite en basse tension sur le réseau de distribution vers le réseau de transport en haute tension. Les réseaux de transport et de distribution du futur devront gérer l'agrégation de millions de points de soutirage et d'injection liés à la production décentralisée, à l'autoconsommation, à l'effacement, au stockage, aux batteries des véhicules électriques (CRE et E-CUBE, 2018). Cette flexibilité nécessaire, liée largement au caractère aléatoire d'une partie de la production, impose de gérer beaucoup d'informations en temps réel, ce qui exige de s'appuyer sur des programmes informatiques sophistiqués.

Le numérique aura également pour fonction de gérer l'interface entre les réseaux d'électricité et les réseaux de gaz, qu'il s'agisse de méthane ou d'hydrogène. Dans l'état actuel de la technologie, le stockage inter-saisonnier de l'électricité ne peut se faire que *via* les stations de pompage ou *via* le *power-to-gas-to-power*. Le potentiel de STEP est limité par la géologie, celui du *power-to-gas* est limité par les rendements. Comme le rappelle Sapy (2021), pour pouvoir déstocker 1 kWh d'électricité il faut en avoir dépensé 3 si on utilise la filière hydrogène (électrolyse de l'eau), et 5 si on utilise la filière méthane (« méthanation » avec incorporation de CO₂). Le numérique là encore permettra les arbitrages entre réseaux d'électricité, réseaux d'hydrogène, de méthane et de carbone. Mais au vu des faibles rendements et des coûts actuels élevés, de telles solutions ne seront rentables qu'à moyen ou long terme. De grands espoirs sont néanmoins fondés sur les électrolyseurs à haute température, qui pourraient rendre l'hydrogène « vert » compétitif dans un futur plus ou moins proche.

L'absence de réseaux interconnectés

Dans beaucoup de pays en développement, le raccordement de villages isolés au réseau interconnecté est encore prohibitif. C'est particulièrement le cas en Afrique subsaharienne. Grâce au numérique, des solutions décentralisées peuvent servir de transition. On peut évidemment recourir à des blocs électrogènes utilisant du diesel, mais c'est souvent coûteux et polluant. Il existe aujourd'hui des kits solaires de faible puissance qui permettent de satisfaire les besoins de base (recharge d'un téléphone portable, conservation d'aliments ou de médicaments dans des réfrigérateurs, accès à la télévision pour la formation et les loisirs). Le financement se fait *via* le mécanisme du *pay-as-you-go* : le client loue l'installation et paie au fur et à mesure qu'il consomme de l'électricité, *via* un prélèvement à distance sur son compte bancaire (Percebois, 2019). Le fournisseur du service peut faire l'entretien de l'installation à distance, et il peut également couper l'accès en cas de défaut de paiement (*on/off remote control*). Cela n'est possible que grâce aux progrès du numérique. L'interconnexion du pays ne se fait plus « en étoiles », par extension du

réseau existant, mais en « tâches de léopard », par raccordement progressif de zones décentralisées déjà électrifiées grâce à de la petite production renouvelable, souvent solaire ; cela permet une électrification rurale plus rapide.

Conclusion

La transition énergétique va s'accompagner d'une électrification croissante des usages, notamment dans la mobilité mais aussi du fait du développement des objets connectés. Les réseaux d'électricité, qui devront en temps réel gérer des millions de points d'injection et de soutirage, auront besoin de s'appuyer sur des plateformes numériques pour opérer les arbitrages entre production, consommation et stockage de l'électricité. Les technologies quantiques vont révolutionner la gestion de ces millions d'informations. Un ordinateur classique ne peut pas rapidement trouver le meilleur ordonnancement de plusieurs milliers de véhicules à recharger en fonction des priorités souhaitées par les propriétaires, du temps de charge et du coût du kWh à la borne de la recharge. Il faut de nouvelles technologies beaucoup plus performantes. Demain, on pourra aussi stocker des quantités très importantes de données en se basant sur le *spin* de l'électron, grâce à des appareils qui consommeront moins d'énergie et émettront moins de chaleur que les *data centers* actuels. Les progrès attendus dans le domaine du numérique et de l'intelligence artificielle vont dès lors constituer un atout majeur pour les gestionnaires des réseaux d'électricité.

Bibliographie

ANDRAE A. & EDLER T. (2018), « Pour une sobriété numérique », <https://theshiftproject.org>, rapport.

BEEKER E. (2017), « Énergie centralisée ou décentralisée ? », *France Stratégie*, janvier.

BEEKER E. & HAUET J. P. (2019), « La pointe électrique : anticiper pour maîtriser », *EdEnmag*, Focus n°8.

CRE (Commission de régulation de l'énergie) & E-CUBE (2018), « Monographie n°3 sur les réseaux électriques ; étude sur les perspectives stratégiques de l'énergie », mai.

OIE (Observatoire de l'industrie électrique) (2017), « La gestion de l'équilibre du système électrique », *Fiche pédagogique*, avril.

PERCEBOIS J. (2019), « Les défis de la transformation du secteur électrique européen. Concurrence, numérique et réseaux », *Études IFRI*, novembre.

PwC (2018), « Tendances de la transition énergétique », *PwC*, note, avril.

SAPY G. (2021), « Électricité 100 % renouvelable : solution miracle ou mortifère utopie ? », *La Revue de l'énergie*, n°654, janvier-février, pp. 23-34.

Les enjeux réglementaires du numérique dans les systèmes électriques

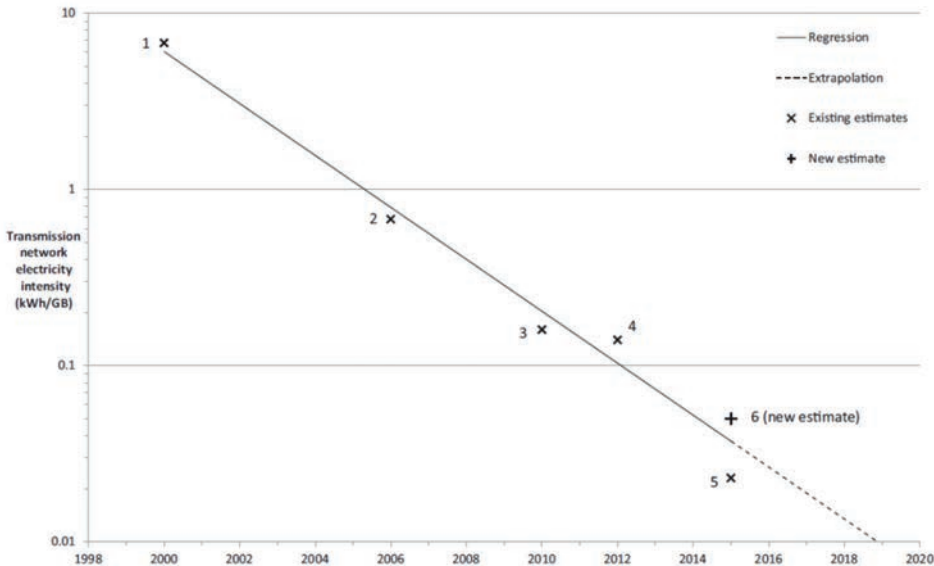
Par **Ivan FAUCHEUX**

Ingénieur général des mines, membre du collège de la Commission de régulation de l'énergie (CRE)

Numérique et énergies, une symbiose qui reste à faire

Des promesses de valeur fortes

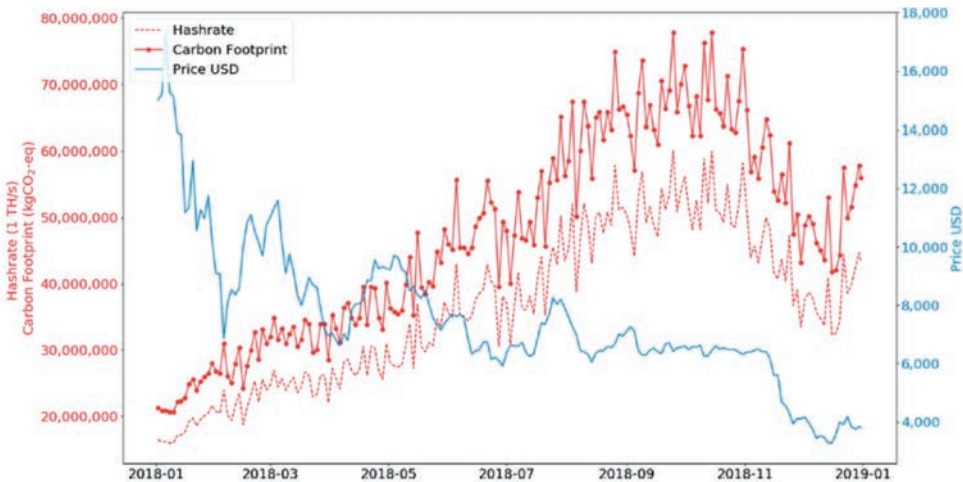
Le numérique et l'énergie électrique sont liés par des relations qui semblent symbiotiques : si l'énergie est indispensable pour faire fonctionner les systèmes numériques, les technologies de l'information sont présentées comme des leviers pour rendre encore plus efficace le système énergétique. Ainsi, tout serait pour le mieux dans le meilleur des mondes si l'on s'arrêtait là, considérant que la loi de Moore rend par nature les systèmes numériques toujours plus sobres et que la transition énergétique a un besoin absolu de numérique, que ce soit pour contrôler la production intermittente des énergies renouvelables ⁽¹⁾, pour gérer des réseaux soumis à des fluctuations toujours plus complexes, pour assurer un marché de l'énergie toujours plus sophistiqué dans ses produits et enfin pour offrir au consommateur les moyens de piloter sa consommation en aval. De la sorte, la consommation énergétique pour la transmission des données diminue en moyenne d'un facteur 2 tous les deux ans, nous permettant pour nombre de données constantes d'envisager un avenir radieux concernant les liens entre énergie et numérique.



Source : Joshua Aslan, 2017

(1) Par exemple par des modèles météorologiques toujours plus fins, hypothèse étant faite que l'essentiel des énergies renouvelables utilise l'énergie mécanique du vent ou radiative du soleil...

Cependant, il arrive que les relations soient moins vertueuses qu'imaginées. Pour reprendre l'exemple du Bitcoin, et sans se prononcer sur la question des cryptomonnaies, à cause des calculs informatiques complexes qu'elles nécessitent (le minage, ou le nombre de *hash* nécessaire pour atteindre une résistance suffisante de la validation des transactions, et ainsi recevoir la part de cryptomonnaie correspondante), chaque transaction en Bitcoin a besoin d'environ 215 kilowattheures (kWh) d'énergie, soit plus que la consommation d'un ménage français pour deux semaines. Et cette part est en constante augmentation avec une augmentation corrélative du besoin en énergie et des émissions de gaz à effet de serre :



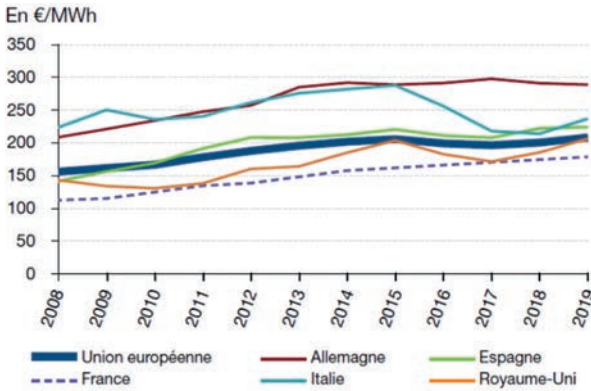
Source : Susanne Köhler, 2019

Mais des différences majeures de dynamiques

De même que les promesses du numérique dans le domaine de l'accroissement du PIB sont encore l'objet de débats, et que l'enjeu de l'urgence à réaliser la transition énergétique ne cesse de croître, trois différences majeures doivent, en termes de régulation et d'interaction entre ces deux secteurs, être pointées.

La première touche au fait que le prix de l'énergie reste dans le temps en relative croissance, tout du moins en Europe. Ce prix est constitué en France pour un tiers du coût de fourniture de l'énergie, pour un tiers du coût d'utilisation des réseaux et pour un bon tiers de taxes. Si la transition énergétique peut inclure une promesse de baisse de coût à terme pour la composante énergétique, l'investissement dans les réseaux est lui une composante en forte croissance structurelle (100 milliards d'euros sont prévus dans les plans d'investissement de RTE et d'Enedis pour les quinze prochaines années pour assurer leur renouvellement, mais aussi pour accompagner l'inclusion toujours croissante de sources décentralisées d'énergie non pilotable ⁽²⁾). Quant aux taxes, l'état des finances publiques en France et dans les pays de l'OCDE à la suite des plans de relance ne permet pas d'envisager raisonnablement une baisse importante dans les années qui viennent. Si le secteur veut continuer à contribuer à la croissance, il est condamné à faire plus de services avec moins d'énergie, compte tenu de la contrainte budgétaire. Le numérique est un des leviers d'une efficacité accrue, mais qui peine à se concrétiser.

(2) La maîtrise du coût pour le consommateur final de cette masse d'investissement est aujourd'hui envisageable dans un contexte de taux modérés et donc de rémunération du capital investi moins importante que par le passé.



Source : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-06/datalab_essentiel_217_prix_electricite_france_ue_2019_juin2020.pdf

La deuxième est une capacité d'adaptation des systèmes électriques : les déviations de fréquence autorisées sont faibles là où, dans les télécoms, des baisses de débit sans que la perte de qualité de service ne soit ressentie de façon importante par l'utilisateur final sont possibles. L'équilibrage entre offre et demande en électricité est devenu un métier à part entière des gestionnaires de réseaux de transport à des échelles européennes. La stabilité de la fréquence de la « plaque » Europe du Nord est le fruit d'une coopération renouvelée entre tous les gestionnaires de réseaux de transport.

Enfin, les temps critiques entre les deux secteurs sont très différents. Là où une unité de production d'énergie dure entre vingt ans pour les premières installations d'énergies renouvelables à une durée encore indéterminée pour les anciennes installations, et les installations de chauffage durent entre quinze et quarante ans⁽³⁾, le renouvellement des équipements numériques est beaucoup plus rapide. Un *smartphone* ou un ordinateur ne dure guère plus de sept ans sauf pour les quelques rares réfractaires qui tentent encore d'utiliser leur Bi-Bop⁽⁴⁾ (le premier téléphone portable en France)...

Trois exemples de convergence difficile

Le compteur électrique intelligent : une promesse de valeur encore en suspens

Sans doute l'équipement le plus emblématique, parmi les plus polémiques, mais pas forcément le plus visible⁽⁵⁾ de l'irruption du numérique dans le secteur de l'électricité, a été le compteur Linky. Cet équipement a fait l'objet de nombreuses études sociologiques quant à son acceptabilité. Il a fait l'objet par ailleurs d'une attention toute particulière de la CNIL quant au consentement des utilisateurs et à la durée de conservation des données par les fournisseurs d'énergie⁽⁶⁾, preuve de la sensibilité exacerbée du sujet en regard d'autres systèmes de collecte des données personnelles (compte Google, géolocalisation des *smartphones*, etc.) qui offrent sans doute des potentiels d'exploitation plus grands que la mesure des données de consommation énergétique pour des acteurs malveillants ou intrusifs.

Cependant, si nous sommes tous collectivement à la fois enclins à abandonner nos données personnelles dans le cadre des équipements numériques sans poser beaucoup de questions et si attentifs aux mesures de nos données de consommation énergétique, c'est sans doute lié à deux facteurs majeurs :

- Le premier est que le monde numérique offre une palette de services immense, là où Linky et la mesure de la consommation énergétique restent aujourd'hui limités en termes de services

(3) Source : <https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2018/05/sypemi-guide-duree-de-vie-conventionnelle-biens-equipements-vf.pdf>

(4) En vain, à chaque fois que j'essaie...

(5) Sauf si vous avez décidé de le faire trôner au milieu de votre salon, entre deux tableaux.

(6) <https://www.legifrance.gouv.fr/cnil/id/CNILTEXT000043133217>

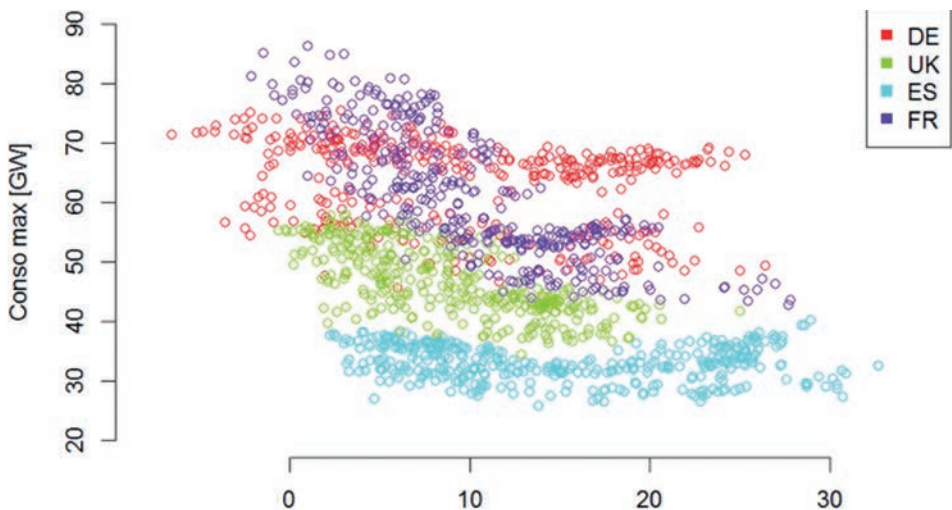
additionnels au plaisir de pouvoir suivre sur son *smartphone* sa facture énergétique en temps réel. La vraie question est de savoir ce que le comptage intelligent peut apporter comme services aux consommateurs finals.

- Le second, plus d'ordre sociologique, est que l'énergie reste un monde encore difficile à appréhender dans son lien entre énergie consommée et services offerts. Hors quelques technophiles, peu de monde sait à quoi correspond un kWh, quelle quantité d'électricité il faut mettre dans une voiture (électrique...) pour faire 100 km, etc. À l'inverse, hors quelques réfractaires, tout le monde connaît la taille d'une vidéo de bonne qualité en Mo, voire le débit nécessaire sur son téléphone ou sa *box* pour pouvoir envoyer des fichiers importants, regarder une vidéo en *streaming*. Bref, le monde de l'énergie reste aujourd'hui muet au sens sociologique du terme sur ce qu'il apporte aux consommateurs.

Finalement, tout se passe comme si l'énergie était devenue si naturelle pour le consommateur final que sa remise en cause, sous l'effet notamment de l'urgence du changement climatique, et ses évolutions numériques étaient des grandes inconnues.

La météorologie, un acteur fortement consommateur de numérique devenu indispensable pour le secteur électrique

Historiquement, la météorologie était et représente encore un enjeu majeur du système électrique national, car la France se caractérise, au niveau européen, par un recours relatif très important à l'électricité aux fins de chauffage, lié à l'importance de la production d'électricité nucléaire, à l'ancienneté de son utilisation à des fins domestiques, et non uniquement industrielles, et enfin à l'état de son parc immobilier en termes d'isolation. Cette spécificité française entraîne en conséquence une très forte thermosensibilité du système électrique français, de l'ordre de 2,3 GW par degré Celsius en hiver, soit deux tranches nucléaires par degré, soit la moitié de la thermosensibilité européenne, de l'ordre de 5 GW/°C⁽⁷⁾.



Thermosensibilité de quatre pays européens (Allemagne, Royaume-Uni, Espagne et France) pour l'année 2015⁽⁸⁾ ;
Source : <https://www.energy-alternatives.eu/2019/05/24/variabilite-de-la-consommation-electrique-et-thermo-sensibilite.html>

(7) Robin Girard, 24 mai 2019, « Variabilité de la consommation électrique et thermosensibilité » : <https://www.energy-alternatives.eu/2019/05/24/variabilite-de-la-consommation-electrique-et-thermo-sensibilite.html>

(8) Analyse issue des recherches de Robin Girard, déjà cité.

Cette spécificité de la thermosensibilité française crée des contraintes supplémentaires pour le réseau d'électricité, qui doit faire face à d'importantes pointes de consommation le matin et autour de 19 heures, et à des soutirages très supérieurs en période hivernale. Pour les gérer efficacement, des renforcements du réseau sont nécessaires. Ceux-ci, coûteux (de 21 à 57 euros par kW selon l'étude sur la modernisation des réseaux électriques dans le G7⁽⁹⁾), sont financés par les consommateurs d'électricité, *via* les ressources issues du tarif d'utilisation du réseau public d'électricité (TURPE).

Par ailleurs, compte tenu de la variabilité des énergies renouvelables électriques et du caractère très sensible à la température de la consommation énergétique française, les prévisions météorologiques permettent de mieux en mieux à RTE d'assurer l'équilibre entre offre et demande à différents pas de temps (intrajournaliers et journaliers), et d'optimiser les besoins en réserves. Les données météorologiques constituent également un enjeu important pour les exploitants de centrales photovoltaïques ou éoliennes, qui assurent le rôle de « responsable d'équilibre ».

Enfin, à moyen terme, les données météorologiques sont nécessaires pour optimiser la disponibilité des centrales de production. Les prévisions météorologiques allant de la semaine à quelques mois donnent, sous forme probabilisée, de la visibilité aux exploitants de centrales pour programmer les opérations de maintenance au moment où la demande d'énergie sera probablement le plus faible (ainsi que son prix). Ces prévisions, régulièrement actualisées, sont établies par les services météorologiques, notamment à partir de l'observation des océans et de leur réchauffement en surface. Enfin, sur une échelle de temps plus longue, les données de vents et les cadastres solaires sont également indispensables pour que les développeurs optimisent l'implantation, et donc le potentiel productif, des nouvelles centrales d'énergies renouvelables.

Tous ces éléments conduisent le système électrique européen, et tout particulièrement français, à être consommateur de données météorologiques dont la précision et la fiabilité s'appuient sur des puissances de calcul toujours plus élevées, conduisant les opérateurs météo à se doter de supercalculateurs en propre, mais aussi et surtout à des besoins accrus en énergie pour faire récupérer les données d'observation, et faire fonctionner ces équipements.

Les *data centers*

Avec le développement de services hébergés sur le *cloud*, ou encore des solutions de type *software-as-a-service*, les centres de calculs qui étaient encore anecdotiques il y a quelques années (en 2014, la consommation électrique des *data centers* représentait 1 % du secteur tertiaire) montent en puissance. Ainsi, sur 182 *data centers*, dont 42 en Île-de-France, raccordés au réseau électrique en 2017, RTE prévoit une hausse de plus de 86 % d'ici 2025, pour des puissances moyennes appelées de 5 MW par unité. L'ATEE (Association technique énergie environnement) considère que, sur une durée de vie de dix ans, 49 % du coût global des *data centers* est imputable à ses OPEX (ou dépenses d'exploitation, de l'anglais *operational expenditure*) pour son alimentation énergétique. C'est pourquoi les solutions qui accompagnent leur efficacité énergétique sont des leviers importants d'optimisation des coûts et de compétitivité.

Selon une étude menée par l'Agence internationale de l'énergie, Green IT, Négawatt, France Stratégie, l'Ademe et The shift Project, entre 2017 et 2018, la consommation des TIC (Technologies de l'information et de la communication) représentait 3,7 % des émissions de CO₂ mondiales, en croissance constante. En 2017, d'après The Shift Project, les *data centers* représentent 19 % de la consommation d'énergie dans le paysage du numérique, et leur nombre est en croissance constante au niveau mondial : le fort développement des modèles numériques du *pay-per-use*, conduisant à ne plus démultiplier les logiciels au niveau des unités individuelles, mais à remonter

(9) (2018), « Modernisation des réseaux électriques dans le G7 », rapport de la présidence canadienne du G7.

les capacités de calcul et de traitement des données sur des ordinateurs centraux auxquels ont accès les clients *via* des API (des interfaces de programmation), accélère encore cette croissance.

Quels effets sur la régulation ?

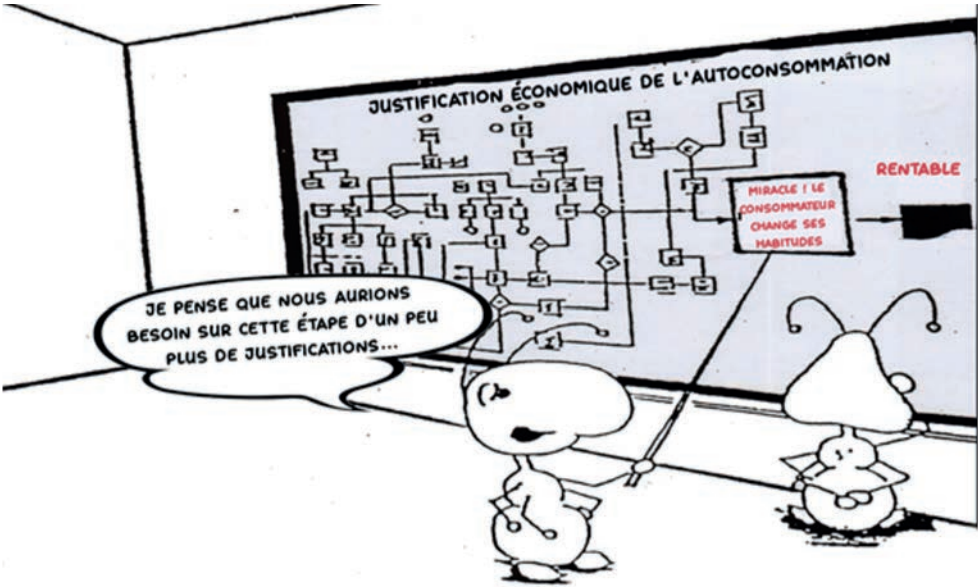
Il est aujourd'hui infiniment compliqué d'affirmer ce que devrait être une bonne régulation du marché de l'électricité. Cependant, un constat est que le système électrique est aujourd'hui traversé par deux courants majeurs qui s'enchevêtrent : la transition énergétique vers moins d'émissions de gaz à effet de serre et son urgence eu égard au changement climatique, et le numérique qui offre un potentiel d'efficacité inédite pour le secteur électrique. La prudence et la sagesse conduisent à poser des questions et à esquisser de premières idées.

Les effets de l'arrivée du numérique dans le secteur électrique sont de plusieurs ordres pour sa régulation :

- Tout d'abord, le numérique ouvre le champ des possibles pour les modèles économiques des acteurs du système électrique. La fiabilité des prévisions de production et de consommation est un des enjeux majeurs pour les producteurs d'énergie, mais aussi pour les fournisseurs d'énergie ainsi que pour les acteurs des marchés de gros. Or ces nouveaux modèles interviennent dans le contexte d'une régulation souvent très spécialisée par domaines. C'est pourquoi l'un des premiers effets sur la régulation sera une exigence accrue de réactivité de cette dernière face aux nouveaux modèles qui émergent, et surtout la capacité à faire des liens entre différents aspects de cette régulation. L'émergence des bacs à sable réglementaire dans le monde de l'énergie illustre cette prise de conscience (près de dix pays, dont la France, ont mis en œuvre de tels dispositifs dans le domaine énergétique⁽¹⁰⁾).
- L'autre effet majeur sur la régulation de l'électricité est une exigence accrue sur les composantes numériques des opérateurs régulés, et leurs investissements dans le domaine. En effet, sous l'effet de la numérisation d'une grande partie des activités des opérateurs de réseaux (qui deviennent parfois des opérateurs de salles de marché ou maîtres d'ouvrage de systèmes d'information à part entière), ainsi que du déploiement de nombreuses infrastructures numériques (Linky, notamment), le métier de ces opérateurs évolue, et leurs budgets dans le domaine augmentent...
- Le troisième effet du numérique est l'arrivée d'un consommateur qui, grâce à l'interactivité des technologies de l'information, devient aussi acteur. Cet effet nécessite de mieux comprendre comment cet acteur agit, interagit, voire ne souhaite pas agir dans le domaine énergétique. Cette compréhension des aspects comportementaux du consommateur énergétique et de plus en plus électrique est un enjeu crucial d'une régulation au bénéfice d'un acteur de moins en moins passif.

Enfin, un enjeu majeur pour la régulation du secteur sera d'utiliser aussi les données qui remontent dorénavant massivement, pour avoir de nouveaux outils de contrôle et d'incitation de l'activité de ces opérateurs. En effet, autant le numérique influence les activités d'opérateurs régulés, autant il accroît également l'information dont dispose le régulateur. Or, l'enjeu d'une régulation est d'abord de réduire l'asymétrie d'information entre l'opérateur et la puissance publique. Mais ces nouvelles possibilités pour une régulation plus efficace restent à construire, car une masse de données n'a jamais donné du sens en tant que telle. La connaissance pointue du secteur dans ses aspects techniques, économiques et sociologiques reste un prérequis afin de pouvoir se saisir efficacement des opportunités qu'offre le numérique, pour avoir des informations toujours plus fines et plus abondantes.

(10) <https://questcanada.org/wp-content/uploads/2020/07/Innovation-Sandboxes-Report-1-EN.pdf>



(Source : DR)

Bibliographie

- ASLAN J. *et al.* (2017), "Electricity intensity of Internet data transmission: Untangling the estimates", *Journal of Industrial Ecology*, pp. 785-798.
- KÖHLER S. & PIZZOL M. (2019), "Life cycle assessment of Bitcoin mining", *Environ. Sci. Technol.*, 53, pp. 13598-13606.

Les enjeux technologiques et industriels du numérique dans les réseaux électriques

Par **Michel MORVAN**

Cofondateur et président exécutif de Cosmo Tech

Les défis systémiques de l'énergie dans un monde incertain

Le 15 février 2021, les conditions météorologiques extrêmes au Texas (États-Unis) ont démontré l'impact croissant du changement climatique sur les réseaux. Confronté à des températures en chute libre, à des tempêtes de neige et à une cascade de pannes de centrales électriques, le Texas a failli perdre une grande partie de son réseau électrique pendant des semaines. Cette crise énergétique a aussi mis en lumière les conséquences de l'absence de connexion du réseau électrique texan au reste du réseau américain.

Cet événement souligne concrètement la dimension des défis systémiques et le niveau d'incertitude auxquels sont confrontés les dirigeants du secteur de l'énergie. Les événements climatiques augmentent le niveau de risque financier des entreprises de réseau, alors que celles-ci font face à trois autres défis majeurs :

- Le premier est le « mur d'investissement » que représente le renouvellement des réseaux de transport construits après la Seconde Guerre mondiale, et qui arrivent maintenant à la fin de leur vie utile. Il est donc crucial de savoir où investir en premier et quels seront les effets en cascade de ces choix, qui auront un impact pendant des décennies sur l'ensemble du réseau.
- Le deuxième défi, qui rend chaque décision encore plus complexe, est l'influence de la transition actuelle du marché de l'énergie : les énergies renouvelables, les réseaux intelligents, le déploiement plus important de véhicules électriques auront tous une influence sur la dimension des futurs réseaux, et doivent être pris en compte dans les décisions d'investissement ou de maintenance. L'intégration des énergies renouvelables induit également un système plus dynamique, plus instable, qui demande aux opérateurs de réagir beaucoup plus vite pour le contrôler.
- Le troisième défi est de savoir comment faire face au vieillissement des équipes. Saisir et conserver la valeur des connaissances et l'expertise des équipes est essentiel.

La complexité, le risque systémique et l'incertitude sont la nouvelle norme. Gagner en visibilité, anticiper l'avenir et permettre une réponse plus rapide et plus agile est une nécessité absolue afin de gérer cette nouvelle donne. Cet état de fait peut être inquiétant, mais il est aussi source d'immenses possibilités de création de valeur. Les technologies sont aujourd'hui prêtes et ont un grand rôle à jouer dans le pilotage des organisations, pour décider de façon plus confiante et efficace, ainsi que dans le renforcement de leur capacité d'adaptation en temps réel. Ce sont des pourvoyeurs de résilience.

L'évolution des technologies pour relever ces défis

De nombreux acteurs ont investi dans le *big data* et l'Internet des objets (*Internet of Things* ou *IoT*). Les données des consommateurs sont disponibles grâce aux compteurs intelligents, et les données du réseau sont également plus accessibles.

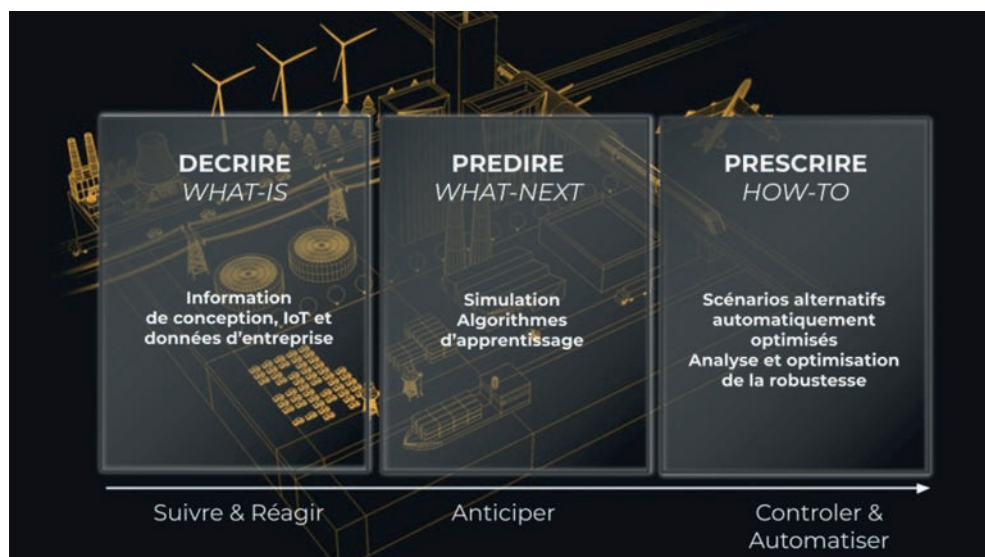
L'usage de l'intelligence artificielle progresse de même pour la conduite du système électrique, avec le développement d'assistants pour simplifier la tâche des opérateurs sur des milliers de tâches répétitives, telles que par exemple l'ouverture d'un sélecteur en automatisant des envois d'ordre et de récupération des informations.

L'écosystème des jumeaux numériques est en forte croissance dans le secteur de l'énergie. La nouvelle génération de jumeaux numériques simulables intègre trois avancées fondamentales pour relever les défis systémiques des réseaux électriques :

- initialement développés pour répliquer virtuellement un actif, ou un *process*, les jumeaux numériques peuvent à présent répliquer virtuellement un écosystème, réconciliant les différentes vues nécessaires à la prise de décision pour répondre à la multiplication d'injonctions souvent contradictoires (réduction des coûts, robustesse...) ;
- intégrant des capacités de simulation, les jumeaux numériques permettent de projeter l'évolution du réseau électrique à court et à long terme ;
- ces écosystèmes numériques peuvent être connectés et synchronisés en temps réel.

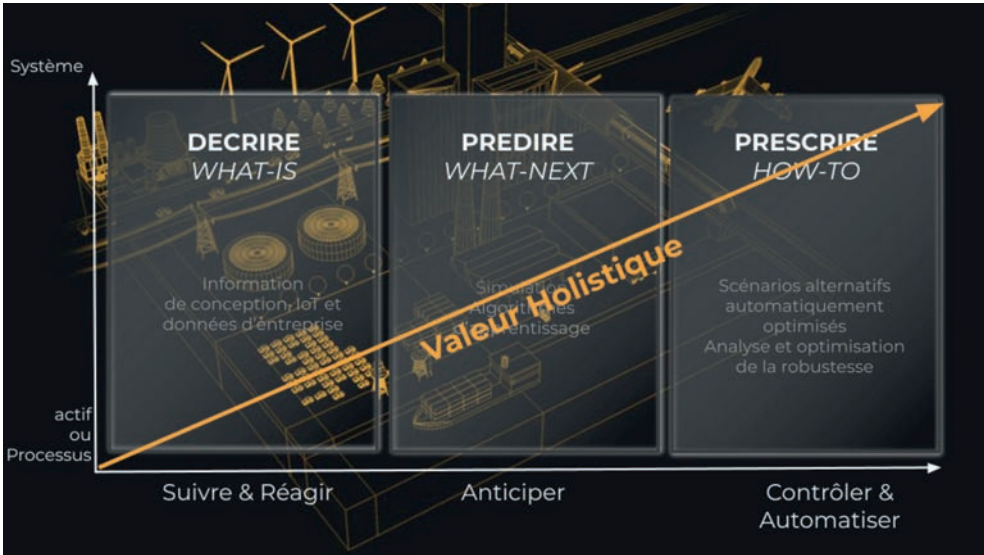
Les jumeaux numériques simulables apportent aujourd'hui trois niveaux de compréhension, décrits dans le schéma ci-dessous : la description de ce qui existe et de ce qui se passe, la prédiction des futurs possibles, et enfin la prescription des voies d'optimisation et d'action.

En combinant ces niveaux, les jumeaux numériques simulables aident l'industrie à passer de la réaction à l'anticipation, puis à un meilleur contrôle, voire à une certaine automatisation de ses performances.



© Cosmo Tech

Les jumeaux numériques simulables ont une approche holistique du réseau et prennent en compte toute la diversité et l'hétérogénéité de la réalité considérée telles que les actifs, les équipes, les politiques environnementales et réglementaires, les contraintes budgétaires d'investissement, ainsi que des événements externes tels que les conditions climatiques, les contraintes des fournisseurs externes ou encore l'évolution des demandes des « prosommateurs » (un prosommateur désigne un utilisateur du réseau disposant d'une installation de production d'électricité décentralisée qui est susceptible d'injecter et de prélever de l'électricité au réseau).



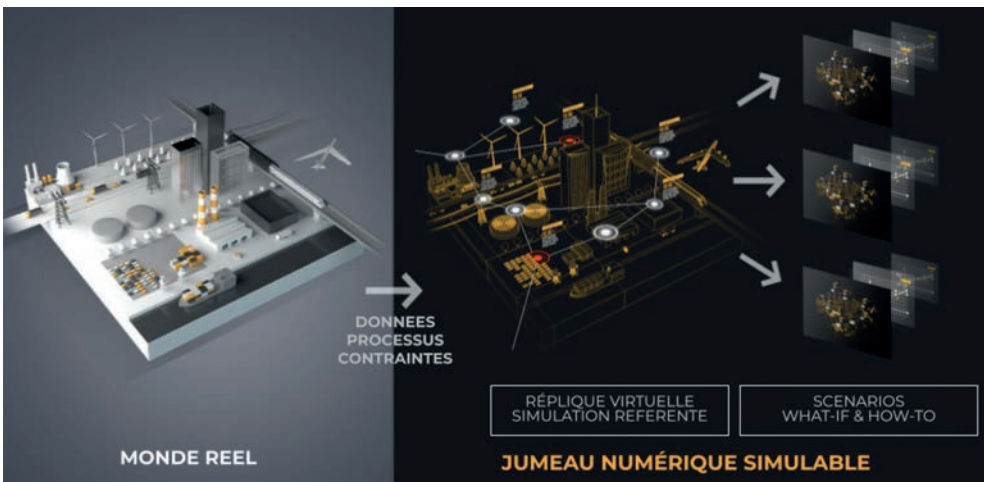
© Cosmo Tech

Plus le jumeau numérique permet de comprendre et d'optimiser la prise de décision (axe horizontal) de manière systémique, en tenant compte de toute la complexité de la réalité considérée et de ses contraintes (axe vertical), plus la compréhension et la valeur holistique fournies seront importantes.

Jumeaux numériques simulables en action et applications

Simuler et optimiser le futur

Les jumeaux numériques simulables ont une approche différente des solutions d'intelligence artificielle existantes. La modélisation du monde réel, symbolisée dans le schéma ci-après, ne s'appuie pas uniquement sur des données historiques, mais également sur les processus et les contraintes du réseau déterminant les interdépendances et les règles de causalité entre les éléments du système simulé. La structure et la dynamique de l'organisation est donc répliquée dans toute sa complexité, pour donner une vision à 360° de l'organisation et simuler son comportement futur, même dans des conditions qui n'ont jamais eu lieu.



© Cosmo Tech

Sur le jumeau numérique ci-avant, en bas de la page 21, les décideurs stratégiques et opérationnels du réseau peuvent exécuter des milliers de simulations, afin de prédire l'état futur du système et tester des scénarios “*What-if*” ou “*How-to*” :

- les scénarios “*What-if*” représentent des variations du futur, prédisant l'effet d'une décision (les conséquences d'une réduction budgétaire en OPEX – dépenses d'exploitation – ou en CAPEX – dépenses d'investissement), d'un événement attendu (le raccordement à une nouvelle source d'énergie renouvelable) ou redouté (incendie ou rupture d'approvisionnement en matières premières) ;
- les scénarios “*How-to*” fournissent un plan d'action optimisé et exécutable, calculé spécifiquement pour les indicateurs-clés de performance choisis, et décrivant chaque étape du plan.

Ces simulations peuvent projeter l'évolution du système pour les trente prochaines minutes ou les trente prochaines années, selon les besoins et le cas d'utilisation.

Les capacités holistiques de simulation et d'optimisation des jumeaux numériques simulables représentent une avancée considérable pour les gestionnaires de réseaux par rapport aux outils traditionnels, pour déterminer les plans optimaux de gestion et de transformation du réseau, en tenant compte de leur faisabilité et de leur robustesse face aux changements de conditions.

Les outils d'optimisation classiques permettent de déterminer des politiques optimales de gestion du réseau électrique, mais sans donner l'assurance qu'elles soient réalisables. Une politique optimale pourrait être de remplacer tous les actifs vieillissants la même année, bien que ceci soit impossible concrètement lorsque l'on tient compte des contraintes du réseau.

Ces jumeaux numériques prédisent aussi des résultats d'une plus grande fiabilité que les outils d'apprentissage automatique (*Machine Learning*) basés exclusivement sur les données du passé, et ce particulièrement à mesure que la ligne de temps est étendue dans le futur.

TenneT, le gestionnaire de réseau de transport d'électricité (GRT) néerlandais et allemand, s'est par exemple appuyé sur les jumeaux numériques simulables de Cosmo Tech, pour explorer comment optimiser la maintenance et le cycle de vie de ses pylônes. La modélisation intégrait dans ce cas l'état des cycles de vie des tours, y compris les facteurs de développement de la corrosion et de tous les éléments essentiels à la mission (calendriers de travail, projections financières, interruptions de service planifiées...). Les simulations ont ainsi démontré au GRT un potentiel de réduction des risques opérationnels du réseau de 12 %, en gardant la même allocation de ressources.

Augmenter la robustesse du réseau face à l'incertitude

Puisqu'ils reproduisent le comportement du réseau, ces outils offrent tout l'avantage de tester les évolutions possibles du réseau et d'optimiser sa robustesse face aux changements.

RTE, le GRT d'électricité français, utilise ainsi depuis plusieurs années les logiciels de jumeaux numériques simulables de Cosmo Tech, pour simuler et optimiser sa stratégie de gestion d'actifs sur plusieurs cas d'usage. RTE teste ainsi l'effet de ses politiques de maintenance et d'investissement à différentes échelles de temps en fonction des scénarios envisagés, notamment sur l'état de santé du réseau, la qualité de service ou la performance environnementale. Les résultats de ces simulations ont éclairé les équipes de RTE sur leur capacité à investir et à maintenir leurs actifs de façon optimale pour les années à venir, et à évaluer la robustesse et la résilience du système électrique en fonction de différents scénarios de risques encourus.

RTE s'est appuyé sur cette technologie pour la justification de son *business plan* auprès de la Commission de régulation de l'énergie (CRE). En partageant des données objectives et en montrant qu'augmenter le budget de maintenance permettrait de réaliser une économie substantielle sur le

budget global à moyen terme, RTE a pu obtenir de la CRE une hausse budgétaire de 15 % pour la gestion de ses actifs. Dans son rapport public, la CRE incite à la diffusion de cette approche.



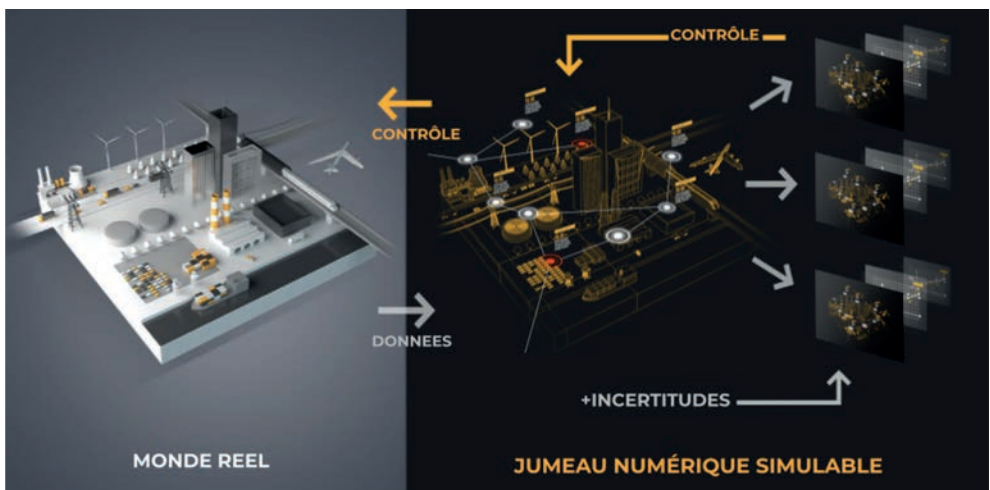
© Cosmo Tech

L'incertitude peut être contrôlée et la robustesse optimisée en quantifiant ses conséquences. Les impacts des conditions climatiques maritimes sur le vieillissement des pylônes tout comme l'augmentation des tempêtes peuvent par exemple être considérés dans les simulations.

La robustesse des stratégies de maintenance et de renouvellement des actifs peut également être optimisée selon les variations potentiellement importantes de l'évolution du parc de production. Selon la transformation du réseau, les flux d'électricité peuvent changer considérablement. Une ligne électrique aujourd'hui secondaire peut être indispensable dans quinze ans pour alimenter trois ou quatre fermes éoliennes, ou pour assurer la stabilité de l'alimentation d'une ville alors que la centrale nucléaire aura fermé.

Donner une vision à 360° du présent et du futur du réseau

Les jumeaux numériques simulables peuvent être connectés à l'écosystème qu'ils représentent afin de retracer le passé, surveiller le présent, prédire l'avenir et indiquer la voie à suivre.



© Cosmo Tech

Cette connexion au monde réel est effective de manière bidirectionnelle.

D'une part, les jumeaux numériques sont à jour avec la réalité, de façon à donner une représentation exacte de l'état opérationnel actuel. L'organisation est ainsi assurée que les décisions prises pour l'avenir correspondent aux réalités du moment.

D'autre part, une boucle de rétroaction, symbolisée par les flèches de contrôle du schéma ci-avant, voir en bas de la page 23, renvoie les résultats d'optimisation obtenus au système du « monde réel ». Cette connexion permet d'automatiser certaines décisions ou de fournir des recommandations d'actions pour validation, accélérant ainsi l'agilité de l'organisation et permettant aux équipes de se concentrer sur des tâches à forte valeur ajoutée.

Cette double connexion augmente encore les capacités déjà à l'œuvre des jumeaux numériques simulables à briser les silos organisationnels, et à fusionner les données provenant d'appareils et de systèmes auparavant disparates, capturant toute la valeur des solutions d'IoT et d'intelligence artificielle mises en place.

Conclusion

Les jumeaux numériques simulables apportent une nouvelle façon de comprendre et de gérer les organisations et les réseaux électriques. Ils donnent une visibilité unique sur les effets des décisions, qu'elles s'appliquent aux opérations quotidiennes ou aux considérations stratégiques, en tenant compte des conséquences en cascade d'événements imprévus.

Avec la digitalisation de l'énergie, l'accélération nécessaire de la transition énergétique et la montée en puissance de l'incertitude, les acteurs de l'énergie auront ainsi de plus en plus besoin de simuler leur système, comme leur écosystème, dans toute leur complexité.

Les jumeaux numériques joueront de plus en plus un rôle-clé en leur permettant de réagir de manière plus rapide et plus agile, et en fournissant la visibilité et la compréhension pour faire des choix optimisés à chaque étape de la transformation du réseau.

Ces technologies n'ont pas vocation à remplacer l'expertise des opérateurs. Elles vont au contraire l'augmenter, leur donnant un champ d'action supplémentaire pour réorienter plus facilement leurs actions ou innover en fonction de l'évolution des besoins. Elles soutiendront considérablement les dirigeants des services publics ou privés de l'énergie à être les conducteurs agiles du changement, pour gérer la complexité, les risques systémiques et l'incertitude qui nous attendent.

L'intégration des équipements numériques dans les systèmes électriques : quelques enjeux de politique publique pour l'Europe

Par **Patrice GEOFFRON**

LEDa, Université Paris-Dauphine, Université PSL, IRD, CNRS, Paris

Les principaux termes du débat sur l'empreinte environnementale des services numériques

Les technologies numériques sont appelées à jouer un rôle croissant dans la décarbonation de l'électricité, pour équilibrer les réseaux, permettre l'injection des énergies renouvelables intermittentes et décentralisées, accélérer les transferts d'usage comme de la mobilité thermique vers la mobilité électrique... (voir l'article de Jacques Percebois, « Le numérique au service de la modernisation des réseaux d'électricité », pp. 6-11).

Ces technologies constituent l'un des leviers de la lutte contre le changement climatique, avec un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre pouvant aller jusqu'à 20 % en 2030, selon certaines estimations, dans un large éventail d'usages (voir Figure 1 ci-après)⁽¹⁾.

Toutefois, dès lors que l'Accord de Paris sur le climat implique une diminution des émissions de CO₂ de 5 à 7 % par an d'ici à 2050, il est impératif d'analyser l'empreinte environnementale de tous les secteurs d'activité, tout au long du cycle de vie. Et le numérique n'échappe pas à cette obligation : l'extraction et la transformation des minerais en amont, les consommations électriques en fonctionnement des équipements, l'efficacité et la complétude du recyclage des matériaux en aval du cycle sont autant de sujets de vigilance. Car il est essentiel que les gains induits par le numérique ne soient pas annulés par ses impacts environnementaux.

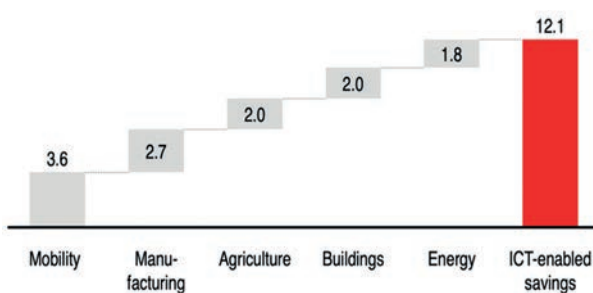


Figure 1. Potentiel de réduction du CO₂ des TIC par secteur (Gtons, 2030) ; Source : WRI, IPCC, World Bank, GeSI, Accenture analysis & CO₂ models

Cette problématique fait l'objet d'un débat nourri et parfois vif : selon les estimations disponibles, les émissions de CO₂ liées aux TIC représentaient environ 4 % des volumes mondiaux en 2020 (Andrae et Edler, 2015 ; Andrae, 2020 ; GeSI, 2019 ; GreenIT, 2019 ; The Shift Project, 2019). Cet ordre de grandeur excède, pour prendre un point de comparaison, les 2 % habituellement attribués

(1) En 2019, la GSMA (association internationale représentant les intérêts d'acteurs de téléphonie mobiles) a publié un rapport expliquant que chaque tonne de CO₂ émise pour les activités de téléphonie mobile permettait d'éviter l'émission de 10 tonnes (par exemple en réduisant les activités de transport). En considérant également les technologies mobiles, Zheng et Wang (2021) établissent des relations positives entre les TIC mobiles et la génération d'énergie renouvelable, à la fois à court et à long terme. D'un point de vue plus macroéconomique, d'autres recherches tendent à démontrer que l'importation d'infrastructures TIC de pointe peut réduire la dégradation de l'environnement dans les pays du G20 (Nguyen *et al.*, 2020).

au transport aérien. Pour 2030, Andrae (2020) estime que les émissions devraient augmenter légèrement pour atteindre environ 5 %. Une telle perspective prolonge d'autres analyses, comme celles de Malmodin et Lunden (2018) qui mettent en avant les gains d'efficacité des TIC durant la décennie 2010 (schématisés par la « loi de Koomey »)⁽²⁾. D'autres travaux sont plus alarmistes, comme ceux du *think tank* The Shift Project (2019) qui envisagent une augmentation pouvant aller jusqu'à 6 % des émissions globales dès 2025, si les gains d'efficacité énergétique observés durant la décennie 2010 étaient épuisés (en se fondant sur les craintes que les gains de performance énergétique soient plafonnés une fois que toutes les « bonnes pratiques » auront été appliquées).

L'une des limites de ces analyses est la capacité à prendre pleinement en compte la trajectoire des nouveaux usages déjà en cours (*streaming* vidéo, jeux en ligne...) ou des nouvelles technologies (IA, Blockchain, IoT, 5G...), et, plus encore, des modifications structurelles induites par la crise sanitaire (travail à distance en particulier).

Quel sera l'effet du déploiement des réseaux 5G sur la consommation d'électricité ?

Le cas de la 5G met en évidence la tension entre la consommation énergétique des TIC et leurs effets de levier en termes de gains d'efficacité dans les activités socio-économiques. Schématiquement, avec la 5G, la charge de trafic sur les réseaux sera considérablement plus élevée (en raison de la nature des usages supplémentaires), mais plus efficace que la 4G en termes de quantité de bits délivrés pour une unité donnée de consommation d'énergie. Une avancée apportée par la 5G concerne le déploiement d'antennes dites "Massive Multiple-Input Multiple-Output" (MIMO) qui transmettent le signal uniquement en direction du mobile communicant, et non plus sur une large zone comme le font les antennes 4G. En outre, la 5G généralise les modes de veille avancée permettant l'extinction des équipements de façon sélective en l'absence de trafic. Cependant, la croissance du volume total de données – très incertaine à ce stade – pourrait entraîner une augmentation de la consommation d'énergie malgré cette efficacité. En outre, le déclassement anticipé de certains équipements 4G – notamment les terminaux mobiles – est également un facteur à prendre en compte dans l'évaluation de la transition de la 4G à la 5G.

La montée en charge de l'industrie des *data centers* est-elle soutenable ?

Dans le débat sur l'empreinte énergétique et environnementale des TIC, l'expansion massive des *data centers* (DC) requiert une attention particulière. Compte tenu de leur nature électro-intensive (liée à la fois à l'alimentation électrique et au besoin de refroidissement), l'activité de ces centres de données est essentielle pour comprendre la dynamique globale de la consommation énergétique des TIC. Une importante littérature a émergé dans les années 2010 pour analyser leur demande en électricité et, en particulier, la dynamique de leurs gains d'efficacité énergétique (Oró *et al.*, 2015 ; Rong *et al.*, 2016 ; Ni et Bai, 2016).

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime en 2020 que la consommation d'électricité des centres de données est restée stable au cours des années 2010 (après une période de forte croissance dans les années 2000) à environ 200 TWh, soit environ 1 % de l'électricité consommée dans le monde, alors même que la charge des DC aura été multipliée par huit sur la même période (alors que le trafic Internet a été multiplié par 12). Exprimée en consommation d'énergie par instance de calcul, l'intensité énergétique a diminué de 20 % par an depuis 2010.

(2) La « loi de Koomey » décrit une tendance à long terme dans l'histoire du matériel informatique. Le nombre de calculs par joule d'énergie dissipée a doublé tous les un an et demi, une tendance remarquablement stable depuis les années 1950.

Andrae (2020) (prolongeant Andrae et Edler, 2015) considère, d'une part, que le niveau évalué à 200 TWh par l'AIE (2020) correspond probablement à une sous-estimation (300 TWh semblant un niveau plus plausible), et, d'autre part, que les gains d'efficacité ne seront plus suffisants pour compenser la demande dynamique de services en courant continu, dont la consommation pourrait atteindre 800 TWh en 2030 (avec une marge d'erreur de ± 200 TWh).

Afin d'apprécier les marges de progrès, il convient de distinguer trois catégories, qui sont en pratique interdépendantes.

Les équipements informatiques

Le nombre de calculs pouvant être effectués par kWh a tendancielllement doublé tous les un an et demi du fait de la diminution continue de la taille des transistors. La perspective de poursuivre ces améliorations soulève des questions à l'approche des limites physiques et techniques associées aux puces à base de silicium. De nouveaux paradigmes pour surmonter les barrières physiques des puces à base de silicium sont envisagés, par exemple les commutateurs quantiques ou les « millivolts ».

Les équipements auxiliaires

Le potentiel d'amélioration réside principalement dans la conception d'un système de refroidissement hautement efficace, car ce besoin a jusqu'à présent surdéterminé l'efficacité énergétique globale des centres de données. Les pertes électriques dans les onduleurs sont également un facteur à prendre en compte (attribuées au double mécanisme de conversion de courant alternatif en courant continu et de retour en courant alternatif).

La gestion efficace de l'informatique

Bien que les serveurs et les supports de stockage soient devenus de plus en plus efficaces sur le plan énergétique lorsqu'ils sont actifs, la sous-utilisation et les pertes en mode veille peuvent constituer une source de déperdition. Un levier important pour améliorer l'efficacité est la consolidation de la charge de travail, qui consiste à augmenter le taux d'utilisation d'un petit nombre de serveurs actifs, plutôt que de faire fonctionner un grand nombre de serveurs sous-utilisés.

Une part de la stabilisation des consommations durant la décennie 2010 tient à une évolution structurelle du secteur, avec le déploiement de centres géants, dits "*hyperscale*", occupant des milliers de m² et d'une puissance de dizaines de MW. Ces *data centers* offrent des gains d'efficacité en permettant la transition vers des services basés sur le *cloud*, réduisant le recours aux équipements « sur site », généralement moins efficaces : les *data centers* les plus performants affichent une PUE de 1,1, contre 1,5 à 2,0 pour des centres plus petits et/ou plus anciens⁽³⁾. Ce qui conduit à s'interroger sur les conditions d'intégration de ces *data centers* massifs dans les systèmes énergétiques : en mobilisant une capacité de *demand response* et d'intégration dans des réseaux de chaleur (pour récupérer la chaleur « fatale »), l'industrie des centres de données dispose également d'un potentiel pour contribuer à l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans le système électrique, plutôt que d'être une simple charge additionnelle (Koronen *et al.*, 2020)⁽⁴⁾.

Néanmoins, la concentration des *datas centers* met en forte tension certains systèmes électriques en induisant des investissements supplémentaires en infrastructures (tant dans le domaine

(3) <https://journal.uptimeinstitute.com/data-center-pues-flat-since-2013/>

(4) L'évaluation de l'efficacité des centres de données est nécessairement multidimensionnelle et ne peut être réduite à un seul indicateur. Ces mesures peuvent être utilisées pour évaluer les différents piliers (refroidissement, informatique, alimentation) ou le centre de données dans son ensemble. Elles peuvent couvrir la consommation totale d'énergie, la consommation d'eau ou les émissions de carbone. L'indicateur le plus utilisé est le Power Usage Effectiveness (PUE) : rapport entre l'électricité totale consommée par l'installation d'un centre de données et l'électricité totale consommée par les équipements informatiques.

de l'énergie que des télécommunications, notamment en ce qui concerne les réseaux de fibres optiques). Diverses projections témoignent de ce phénomène en Europe : en 2030, les *data centers* pourraient représenter de l'ordre de 20 à 30 % de l'électricité consommée au Danemark et en Irlande (selon les opérateurs de réseau électrique nationaux), qui ont développé des stratégies très agressives pour attirer ces investissements.

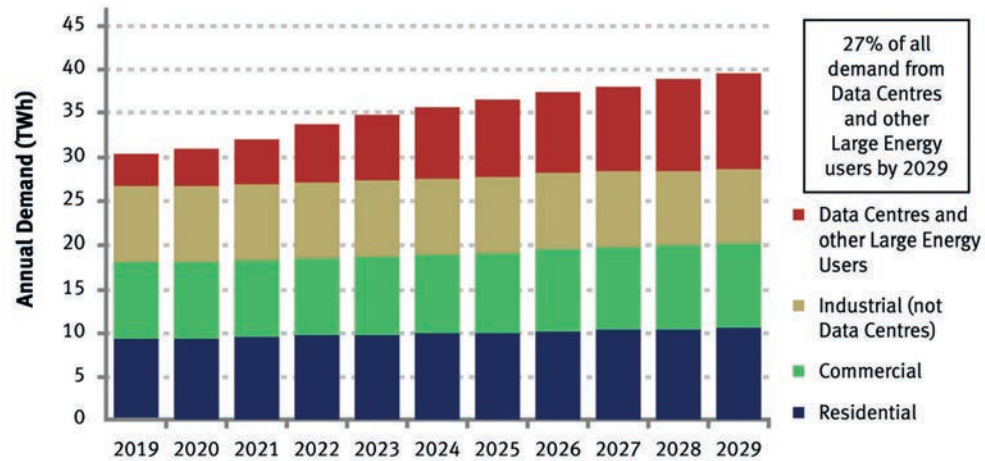


Figure 2. Prévisions des besoins totaux en électricité pour l'Irlande (2020-2029), Source : EIRGRID, SONI.

Et ces tensions ne procèdent pas uniquement que du moyen terme : on observe qu'Amsterdam a établi un moratoire d'un an (en 2019) sur les nouveaux projets de centres de données. Au vu de la forte croissance observée (10 à 15 % par an sur les sept dernières années), les autorités publiques locales ont souhaité organiser une pause afin d'évaluer et d'améliorer les principes en termes d'accès au foncier et à l'énergie. Cette situation observée aux Pays-Bas mérite que l'on s'y attarde, car elle est susceptible de préfigurer d'autres phénomènes de « congestion » en Europe du Nord, qui concentrait jusqu'à présent une part prépondérante des investissements (notamment en raison d'un climat plus propice à la gestion de la dissipation de la chaleur), mais également en France (notamment en Île-de-France).

Quels seront les effets du *edge computing* ?

L'*edge computing* est une architecture informatique distribuée : plutôt que d'être transmises à un DC distant, les données sont traitées à proximité du dispositif qui les génère (objet connecté, *smartphone*...). Plus précisément, l'*edge computing* peut être considéré comme un réseau maillé de micro-centres qui traitent ou stockent localement les données critiques. L'*edge computing* réduit la latence du traitement de l'information, car les données n'ont pas besoin de traverser un grand réseau pour atteindre un serveur *cloud* distant. En limitant la quantité de données traversant le réseau, la consommation d'énergie associée est réduite, mais avec une consommation additionnelle pour les composants TIC à la périphérie. L'*edge computing* joue un rôle essentiel dans la prise en charge des applications de *smart grids*, telles que la gestion de la demande. Au-delà, l'*edge computing* peut prendre en charge la gestion durable des ressources d'énergie renouvelable en permettant d'évaluer en temps réel l'offre et la demande, ainsi que pour optimiser la charge des véhicules électriques. L'ensemble de ces facteurs peuvent concourir à l'organisation de communautés énergétiques, combinant des moyens de production locaux et des systèmes d'échange.

Vers une neutralité carbone des DC en Europe en 2030 ?

En cohérence avec le “Green Deal”, la Commission européenne a fixé en 2020 l’objectif : “*To achieve climate-neutral, highly energy-efficient and sustainable data centres by no later than 2030*”⁽⁵⁾. Cette ambition fait également écho aux préoccupations de l’UE concernant la transformation des industries à forte intensité énergétique, sachant que le secteur des centres de données est celui qui se distinguera par la plus forte croissance au cours de la décennie. Jusqu’à présent, l’Union européenne s’est principalement appuyée sur des efforts volontaires pour gérer les besoins énergétiques du secteur des TIC, par le biais du code de conduite⁽⁶⁾, mais cette démarche sera insuffisante pour aboutir à une neutralité en 2030. L’UE et les États-membres devront sans doute travailler dans une optique de co-régulation avec l’industrie, notamment celle qui a pris l’initiative du “Climate Neutral Data Centre Pact” lancé début 2021, reprenant l’objectif d’une neutralité en 2030.

Un tel objectif est très ambitieux, impliquant des efforts de “*sector coupling*” spécifique entre réseaux électrique, de chaleur et de fibre pour déterminer l’allocation optimale dans l’espace des *data centers* (ce qui implique une coopération entre régulateurs et opérateurs de réseau de l’énergie et des télécommunications). Ce chantier n’est pas le seul, puisqu’il importe également de fluidifier l’accès des opérateurs de *data centers* à un « sourcing » décarboné, notamment *via* des *corporate purchasing power agreements*. Et de se préoccuper du rétrofit ou d’un déclassement des centres de données les plus anciens, dont la performance énergétique est incompatible avec cet objectif.

De même, cette transition ne pourra être mise en œuvre sans une meilleure compréhension des effets de la croissance des *data centers* en Europe, sachant que ces infrastructures serviront tout aussi bien à alimenter des flux de *streaming* vidéo (dont l’utilité peut être mise en question) qu’à organiser des activités « à distance » ou à transformer nos métropoles en *smart cities*, contribuant alors aux objectifs de décarbonation.

Bibliographie

ANDRAE A. S. G. & EDLER T. (2015), “On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030”, *Challenges*, 6(1), pp. 117-157.

ANDRAE A. S. G. (2020), “Hypotheses for primary energy use, electricity use and CO₂ emissions of global computing and its shares of the total between 2020 and 2030”, *WSEAS Transaction on Power Systems*.

BERTOLDI P., AVGERINOU M. & CASTELLAZZI L. (2017), “Trends in data centre energy consumption under the European Code of Conduct for data centre energy efficiency”, *JRC Technical Report*.

CIOARA T. *et al.* (2019), “Exploiting data centres energy flexibility in smart cities: Business scenarios”, *Information Sciences*.

Danish Energy Agency (2020), “Denmark’s energy and climate outlook 2020”.

(5) European Commission (2020), “Shaping Europe’s digital future”: “A circular electronics initiative, mobilising existing and new instruments in line with the policy framework for sustainable products of the forthcoming circular economy action plan, to ensure that devices are designed for durability, maintenance, dismantling, reuse and recycling and including a right to repair or upgrade to extend the lifecycle of electronic devices and to avoid premature obsolescence”.

(6) BERTOLDI P., AVGERINOU M. & CASTELLAZZI L. (2017), “Trends in data centre energy consumption under the European Code of Conduct for data centre energy efficiency”, JRC, technical report.

EIRGRID & SONI (2020), “All-island generation capacity statement”.

European Commission (2020), “Green and digital: Study shows technical and policy options to limit surge in energy consumption for cloud and data centres”, 9 novembre.

FU Y., XU H., KYRI B. & WANGDA Z. (2020), “Assessments of data centers for provision of frequency regulation”, *Applied Energy*, 277.

GeSI (2019), “Digital with a Purpose – delivering a smarter 2030”.

GONG X., ZHONGBIN Z., SIXUAN G., BAOLIAN N., LIU Y., HAIJIN X. & MANFANG G. (2020), “A review on evaluation metrics of thermal performance in data centers”, *Building and Environment*, 177.

GreenIT (2019), “The environmental footprint for the digital world”.

HE H. & SHEN H. (2021), “Minimizing the operation cost of distributed green data centers with energy storage under carbon capping”, *Journal of Computer and System Sciences*, 118.

HUANG T. P., COPERTARO B., ZHANG X., SHEN J., LÖFGREN I., RÖNNELID M., FAHLEN J., ANDERSSON D. & SVANFELDT M. (2020), “A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating”, *Applied Energy*, 258.

International Energy Agency (2020), “Data centres and data transmission networks”.

JIN C., XUELIAN B., CHAO Y., WANGXIN M. & XIN X. (2020), “A review of power consumption models of servers in data centers”, *Applied Energy*, 265.

KAMIYA G. & KVARNSTRÖM O. (2019), “Data centres and energy – from global headlines to local headaches?”, *IEA*.

KAMIYA G. (2020), “The carbon footprint of streaming video: Fact-checking the headlines”, *IEA*, commentary.

KORONEN C., AHMAN M. & NILSSON L. J. (2020), “Data centres in future European energy systems energy efficiency, integration and policy”, *Energy Efficiency*, 13.

KORONEN C. (2018), *Demand-response potential of large-scale data centers in Europe 2030*, thèse de master, Lund University.

LI J. & ZHENGWEI L. (2020), “Model-based optimization of free cooling switchover temperature and cooling tower approach temperature for data center cooling system with water-side economizer”, *Energy and Buildings*, 227.

LIU L., ZHANG Q., ZHAI Z., YUE C. & MA X. (2020), “State-of-the-art on thermal energy storage technologies in data center”, *Energy and Buildings*, 226.

MALMODIN J. & LUNDÉN D. (2018), “The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M Sectors 2010–2015”, *Sustainability*.

MASANET *et al.* (2020), “Recalibrating global data centre energy-use estimates”, *Science*.

MONTEVECCHI, F., STICKLER, T., HINTEMANN, R. & HINTERHOLZER, S. (2020), “Energy-efficient cloud computing technologies and policies for an eco-friendly cloud market”, European Commission, final study report, Vienna, report commissioned by the Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology.

NGUYEN T. T., PHAM T. A. T. & TRAM H. T. X. (2020), “Role of information and communication technologies and innovation in driving carbon emissions and economic growth in selected G-20 countries”, *Journal of Environmental Management*, 261.

NIU T., BO H., KAIGUI X., CONGCONG P., HONGYANG J. & CHUNYAN L. (2021), “Spacial coordination between data centers and power system considering uncertainties of both source and load sides”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 124.

ORÓ E., DEPOORTER V., GARCIA A. & SALOM J. (2015), “Energy efficiency and renewable energy integration in data centres. Strategies and modelling review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*

RONG H., ZHANG H., XIAO S., LI C. & HU C. (2016), “Optimizing energy consumption for data centers”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*

The Shift Project (2019), “Climate crisis: The unsustainable use of online video”.

The Shift Project (2019), “Lean ICT: Towards digital sobriety”.

ZHENG J. & WANG X. (2021), “Can mobile information communication technologies (ICTs) promote the development of renewables? Evidence from seven countries”, *Energy Policy*, 149.

Le *cluster 5* d’Horizon Europe au cœur des problématiques des systèmes énergétiques

Par **Annabelle RONDAUD**

Représentante au comité de programme Horizon Europe pour le *cluster 5*
« climat, énergie, mobilité »

“*Smart grids ; digital technologies of the energy system ; digital innovation hubs ; digital twins ; interoperability ; e-mobility ; electromobility...*”, voici quelques-uns des mots-clés qui parsèment le programme de travail 2021-2022⁽¹⁾ du *cluster 5* « climat, énergie, mobilité » d’Horizon Europe, neuvième programme cadre de recherche et d’innovation. Il couvre de nombreuses problématiques et défis dont ceux liés au changement climatique, aux énergies et à la mobilité *via* le *cluster 5*.

Depuis le 1^{er} janvier 2021, l’Union européenne (UE) a mis en place son nouveau Programme cadre de recherche et d’innovation (PCRI) Horizon Europe (HE). Ce programme ambitieux, doté d’un budget de 95,5 Mds€⁽²⁾ pour les sept prochaines années, a pour objectifs de renforcer les bases scientifiques et techniques de l’Union, de stimuler sa compétitivité y compris celle de son industrie, de concrétiser les priorités politiques de l’UE tout en répondant autant que possible aux grandes problématiques mondiales. Et c’est notamment à travers son deuxième pilier – Horizon Europe est organisé autour de quatre piliers, voir Figure 1 – que le PCRI s’attaque aux grandes problématiques mondiales et à la compétitivité industrielle de l’Union. Parmi ces problématiques, l’une d’elles *via* le *cluster 5* se focalise sur le climat, l’énergie, la mobilité.

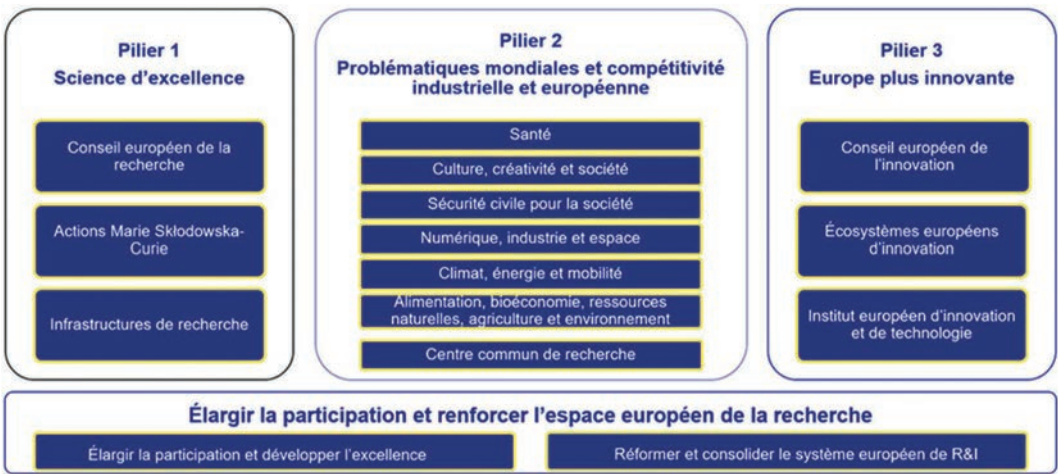


Figure 1. Architecture du programme Horizon Europe (Source : <https://www.horizon-europe.gouv.fr/presentation-du-programme-horizon-europe-24104>)

(1) Le programme de travail est le document dans lequel figurent les appels à propositions. Entre 2021-2027, trois programmes de travail seront publiés, celui contenant les appels 2021-2022, puis celui contenant les appels 2023-2024 et le dernier avec les appels 2025, 2026 et 2027.

(2) En euros courants.

Avec un budget de 15,123 Mds€ pour sept ans, le *cluster* 5 d'HE, comme tous les *clusters* du pilier 2, s'adresse à toute entité – entreprises, PME, organismes de recherche, associations... – et permet le financement, *via* des subventions versées sous forme d'avances non considérées comme des aides d'État, de projets collaboratifs. Participer à ce type de projet offre la possibilité non seulement de financer des projets de R&I, mais également d'internationaliser une technologie, un futur produit et de coopérer avec des partenaires susceptibles de devenir des futurs clients ou fournisseurs.

Le *cluster* 5 « climat, énergie mobilité » a pour ambition d'accélérer la double transition verte et numérique, ainsi que la transformation associée de l'économie européenne, de son industrie et de sa société en vue d'atteindre « la neutralité climatique en Europe d'ici à 2050 ⁽³⁾ », ce qui englobe la transition vers la neutralité des gaz à effet de serre (GES) des secteurs de l'énergie et de la mobilité. Derrière cette ambition, il s'agit de soutenir la mise en œuvre de l'Accord de Paris, des objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies ⁽⁴⁾, ainsi que du « Pacte vert » pour l'Europe et du plan européen de relance économique. « En créant plus d'emplois, en accélérant la transformation économique et sociale, en accélérant la numérisation et en générant une croissance fondée sur l'innovation et l'inclusion, les activités [du *cluster* 5] favoriseront la reprise de l'Europe au lendemain de la crise du Covid-19, contribueront directement aux priorités de la Commission européenne, à savoir un "Pacte vert" européen, une Europe prête pour l'ère numérique et une économie qui fonctionne pour les citoyens ⁽⁵⁾ ».

Pour parvenir à la neutralité climatique à l'horizon 2050, l'Europe doit décarboner son système énergétique qui représente 75 % des émissions de GES de l'UE ⁽⁶⁾. Ce qui implique non seulement de déployer des énergies renouvelables, d'électrifier des usages dans les secteurs des transports, de l'industrie, du bâtiment, de déployer des technologies de captage, de stockage et d'utilisation du carbone, de décarboner des carburants non électriques *via* le recours à l'hydrogène..., mais également de rendre le système plus efficace, plus interconnecté et par là-même plus intégré. Or le modèle actuel sur lequel fonctionne l'Europe se caractérise par « une consommation d'énergie en "silos" dans les transports, l'industrie, le gaz et le bâtiment – chaque secteur possédant une chaîne de valeur, des règles, des infrastructures, une planification et des opérations qui lui sont propres, [ce qui] ne peut pas nous permettre d'atteindre la neutralité climatique d'ici à 2050 de manière rentable ⁽⁷⁾ ». Il convient alors d'exploiter de manière plus globale le système en associant différents vecteurs énergétiques, infrastructures et secteurs de consommation. « Dans ce système, l'électricité alimentant les voitures en Europe pourrait provenir des panneaux solaires se trouvant sur nos toits, tandis que nos bâtiments pourraient être chauffés en utilisant la chaleur produite par une usine voisine, laquelle pourrait être approvisionnée en hydrogène propre produit à partir d'énergie éolienne en mer ⁽⁸⁾ ».

Cette vision a orienté, guidé la rédaction et la construction du *cluster* 5. Celui-ci s'articule autour de six destinations (Figure 2, page 34), et c'est plus particulièrement la destination

(3) Horizon Europe, « Programme de travail 2021-2022 », partie 8, *cluster* 5, p. 15, wp-8-climate-energy-and-mobility_horizon-2021-2022_en.pdf (europa.eu)

(4) Les activités du *cluster* 5 d'HE contribueront à plusieurs ODD, notamment à l'ODD 7 (énergie propre et d'un coût abordable), l'ODD 9 (industrie, innovation et infrastructure), l'ODD 11 (villes et communautés durables) et l'ODD 13 (mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques). En outre, l'ODD 3 (bonne santé et bien-être), l'ODD 6 (eau propre et assainissement), l'ODD 8 (travail décent et croissance économique) et l'ODD 12 (consommation et production responsables) auront un effet positif.

(5) Horizon Europe, « Programme de travail 2021-2022 », partie 8, *cluster* 5, *op.cit.*

(6) Commission européenne (2020), « Alimenter une économie neutre sur le plan climatique : une stratégie européenne pour l'intégration des systèmes énergétiques » : https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/energy_system_integration_strategy_.pdf ; Commission européenne (2020), « Une stratégie de l'hydrogène pour une Europe climatiquement neutre » : https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf

(7) *Ibid.*

(8) *Ibid.*

« Approvisionnement énergétique durable, sûr et compétitif » qui inclut les activités dans les domaines des énergies renouvelables, les systèmes énergétiques, les réseaux et stockage ainsi que la capture, l'utilisation et le stockage du carbone (CCUS).

Destination 1 :	Sciences du climat et réponses à la transformation vers la neutralité climatique
Destination 2 :	Solutions intersectorielles pour la transition climatique
Destination 3 :	Approvisionnement énergétique durable, sûr et compétitif
Destination 4 :	Utilisation de l'énergie efficace, durable et inclusive
Destination 5 :	Solutions de modes de transport propres et compétitives pour tous les modes de transport
Destination 6 :	Services de transport et de mobilité intelligente sûrs et résilients pour les passagers et les marchandises

Figure 2. Les six destinations du *cluster* 5 (Source : Horizon Europe, « Programme de travail 2021-2022 », partie 8, *cluster* 5, p. 16-17, wp-8-climate-energy-and-mobility_horizon-2021-2022_en.pdf (europa.eu))

Rentables, accessibles, sécurisés, flexibles et intégrés !

Autour des systèmes énergétiques que la Commission veut voir intégrés et afin de répondre aux objectifs fixés d'ici à 2050, plusieurs défis sont à relever, défis que la CE *via* des appels à propositions soumet à la communauté (Programme de travail 2021-2022). L'un des premiers défis vise à accroître la part des énergies décarbonées dans le système énergétique, et diminuer ainsi la part des énergies carbonées, ce que l'UE traite principalement, s'agissant de la production d'énergie, en accroissant la part des énergies renouvelables (ENR) – solaire, éolien, marin, biomasse, hydraulique, biocarburants...⁽⁹⁾. Pour ce faire, le *cluster* 5 consacre de nombreux appels à propositions au développement des différentes technologies dans le domaine des ENR et à leur déploiement. Assurer une gestion efficace du réseau tout en intégrant de plus en plus d'**énergies renouvelables** et en garantissant rentabilité, accessibilité, sécurité de l'approvisionnement et stabilité du réseau va nécessiter des besoins accrus de **flexibilité**. Et gérer les pointes de consommation, accompagner les besoins de modulations de la consommation et de la production d'ENR, développer les solutions de réponses à la demande, optimiser en temps réel l'équilibre du système électrique passent par plusieurs options dont le stockage. La destination « Solutions intersectorielles pour la transition climatique » concentre les défis R&I à relever en termes de stockage et couvre toute la chaîne de valeur des batteries ("European Partnership for an Industrial Battery Value Chain"⁽¹⁰⁾) – de leur conception à leur fin de vie en passant par le recyclage de leurs matériaux et constituants – avec des applications visant les énergies et la mobilité. Quant aux activités de R&I en lien avec l'hydrogène, elles sont traitées dans le cadre du partenariat européen "Clean Hydrogen"⁽¹¹⁾.

L'exploitation de synergies passe par l'interopérabilité entre plates-formes de données, l'amélioration de l'interopérabilité et des synergies, non seulement entre les réseaux d'électricité et d'autres vecteurs énergétiques tels que les réseaux de chauffage urbain, l'hydrogène, etc., mais également d'autres secteurs pertinents comme la mobilité. En dépit de progrès technologiques ces dernières décennies dans le secteur des transports, les émissions de GES projetées ne sont

(9) La R&D dans le domaine du nucléaire est traitée dans le programme Euratom.

(10) https://ec.europa.eu/info/files/european-partnership-industrial-battery-value-chain_en

(11) Horizon Europe compte trois types de partenariats : les partenariats cofinancés, coprogrammés et institutionnalisés. Les partenariats sont des protocoles d'accord entre la Commission européenne et un certain nombre d'acteurs sur des priorités définies. "Clean Hydrogen" est un partenariat institutionnalisé. Les partenariats du *cluster* 5 : https://ec.europa.eu/info/horizon-europe/european-partnerships-horizon-europe/candidates-climate-energy-and-mobility_en

pas conformes aux objectifs de l'Accord de Paris. Des activités de R&I plus intenses sont donc nécessaires, et l'électrification des transports et plus largement des mobilités constitue l'un des enjeux du *cluster* 5 (destinations « Des solutions propres et compétitives pour tous les modes de transport » et « Des services de transport sûrs, résistants et de mobilité intelligente pour les passagers et les marchandises ») – sur le volet électrification, d'une part, et sur son adaptation, son intégration au système énergétique, d'autre part. Le *cluster* 5 s'intéresse donc non seulement aux infrastructures nécessaires au développement de l'électromobilité – bornes de recharge ; recharge intelligente capable de faire face à plusieurs millions de véhicules ; connectivité et interopérabilité entre le véhicule et les différents acteurs de l'écosystème de charge des véhicules électriques... –, mais également aux solutions de recharge intelligentes et bidirectionnelles des véhicules (*vehicule-to-hydrogen*, *vehicule-to-grid* et plus globalement *vehicule-to-X*), solutions co-optimisant les besoins des utilisateurs du véhicule électrique, de la maison, du bâtiment et du réseau d'alimentation.

Atteindre la neutralité climatique *via* une vision intégrée suppose aussi de décarboner les industries les plus émettrices de CO₂ et d'optimiser la consommation énergétique des bâtiments et des industries (destination « Une utilisation efficace, durable et inclusive de l'énergie »). C'est pourquoi le *cluster* 5 octroie une place au captage, à l'utilisation et au stockage du carbone (CCUS) en tant qu'option d'atténuation des émissions de CO₂ dans la production d'électricité et les applications industrielles (y compris la conversion du CO₂ en produits). Quant aux actions en lien avec l'efficacité énergétique, elles se pensent au niveau des bâtiments ⁽¹²⁾, mais également aux niveaux des quartiers et des villes ⁽¹³⁾, et composent avec une multitude d'acteurs : sociétés de service énergétique, agrégateurs, gestionnaires des réseaux de distribution, d'énergie, utilisateurs etc.

Intrinsèque au bon fonctionnement d'un système intégré : le numérique

Derrière ce système, des données de plus en plus nombreuses. Favoriser le marché européen des nouveaux services énergétiques et modèles commerciaux ainsi que des interfaces de dispositifs énergétiques testées, standardisées et ouvertes implique des degrés d'interopérabilité plus élevés, une disponibilité accrue des données et un échange de données plus facile entre les entreprises énergétiques ainsi qu'entre les entreprises utilisant les données des systèmes énergétiques, ce que le *cluster* 5 aborde à travers ces différentes destinations. La transition numérique, qui va de pair avec la transition énergétique et qui a accentué la mise sur le marché d'innovations technologiques permettant de valoriser les moyens de flexibilité (*smart grids*, compteurs intelligents, dispositifs de contrôle commande améliorés...), soulève deux questions, toutes les deux abordées dans le *cluster* 5 : la sécurité des données – la pénétration du numérique va permettre de nouveaux usages, mais augmente le risque d'exposition à des cyberattaques – et une meilleure prise en compte du consommateur.

Ce système suppose l'acceptation et la coopération du consommateur, qui voit croître le développement des technologies numériques pour gérer, piloter, sécuriser les flux énergétiques et pour l'aider à surveiller, contrôler, gérer sa consommation, voire à commercialiser sa flexibilité. Le citoyen ou consom'acteur est un maillon-clé de ce système : « Le rôle des citoyens et des

(12) Commission européenne (2020), « Une vague de rénovations pour l'Europe : verdir nos bâtiments, créer des emplois, améliorer la qualité de vie » : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/txt/?qid=1603122220757&uri=celex:52020dc0662>

(13) Le sujet villes et communautés est lié à la mission « 100 villes climatiquement neutres d'ici 2030 - par et pour les citoyens » : https://ec.europa.eu/info/horizon-europe/missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities_en

communautés est indispensable lorsqu'il s'agit de rendre la flexibilité au niveau des appareils disponibles pour le réseau. Dans ce contexte, l'intégration des sciences sociales et humaines (SHS) est essentielle pour favoriser l'acceptation sociale des nouvelles technologies énergétiques et accroître la participation des consommateurs aux marchés de l'énergie » ⁽¹⁴⁾.

Si le *cluster* 5 est le principal *cluster* à traiter des systèmes énergétiques, d'autres *clusters* ou instruments d'HE peuvent aborder les énergies sous différents angles, tel le *cluster* 2 « culture, créativité et société inclusive », le *cluster* 3 « sécurité civile pour la société », le *cluster* 4 « numérique, industrie et espace », le *cluster* 6 « alimentation, bioéconomie, ressources naturelles, agriculture et environnement », ou encore le Conseil européen de l'innovation (EIC) du pilier 3. En outre, d'autres programmes européens financent des actions en lien avec les questions énergétiques comme LIFE ⁽¹⁵⁾, le Fonds d'innovation ⁽¹⁶⁾, InvestEU ⁽¹⁷⁾, les Fonds européens de développement régional (FEDER ⁽¹⁸⁾)... Pour mieux comprendre le programme Horizon Europe et répondre à ses appels à propositions, une seule solution : les points de contact nationaux (PCN) ⁽¹⁹⁾ !

(14) Horizon Europe, « Programme de travail 2021-2022 », partie 8, *cluster* 5, p. 131, *op.cit.*

(15) <https://ec.europa.eu/environment/archives/life/index.htm>

(16) <https://ec.europa.eu/inea/en/innovation-fund>

(17) https://europa.eu/investeu/home_fr

(18) https://ec.europa.eu/regional_policy/en/funding/erdf/

(19) Les points de contact nationaux (PCN) sont établis dans tous les pays bénéficiaires du PCRI ; ils ont pour missions de promouvoir et de faire connaître le PCRI auprès de la communauté de recherche, de développement et d'innovation. Liste des PCN français : <https://www.horizon-europe.gouv.fr/les-points-de-contact-nationaux-24230>

Green energy pricing for digital Europe

By **Claude CRAMPES** and **Yassine LEFOUILI** ⁽¹⁾

Toulouse School of Economics (TSE), Université Toulouse 1-Capitole

“Digital Europe” is a program that will provide an overall budget of €7.5 billion over the 2021-2027 period for projects in five areas: supercomputing, artificial intelligence (AI), cybersecurity, advanced digital skills, and ensuring the wide use of digital technologies across the economy and society (European Commission, 2020). Among multiple other applications, digitalization will help to make energy systems more connected, intelligent, efficient, reliable and sustainable (International Energy Agency, 2017). However, all the strategic areas listed above have a dark side: They are heavy consumers of electric power for both the feeding of data centers and mainframes, and their cooling systems. The energy consumption of data centers in the EU28 increased from 53.9 TWh/a to 76.8 TWh/a between 2010 and 2018, and is expected to increase to 92.6 TWh/a by 2025 (European Commission, 2020). Current world estimates of Bitcoin electricity use are around 44 TWh/a, to be compared with the total consumption of electricity in France that was 474 TWh in 2019 (Kooimey, 2019).

Making digitalization socially profitable therefore requires both an efficient use of electric power by everyone and the greening of power generation. Will digitalization help to save more energy than it consumes?

Responsive demand

Market analyses show that the demand for electricity has low price elasticity, at least in the short run: -0.8 for households in France (Auray *et al.*, 2019), -0.1 on average in the USA (Burke and Abayasekara, 2018). Since public authorities in developed countries exclude the use of indiscriminate blackouts or brownouts as a routine balancing solution, meeting a demand that is both weakly price-reactive and strongly time-varying is very costly. It requires some form of MW storage, by installing large production capacities, although some are dispatched only a few hours a year, but also MWh storage by temporary transformation of electricity into another form of energy (*e.g.* in pumping stations and hot water tanks), which entails substantial energy losses during the dual conversion process.

Given the constant progress being made in digital technology, fighting the demand-inelasticity curse is nevertheless getting easier and easier. It is gradually becoming cost-efficient to encourage demand to adapt to supply, both in spot markets (spot pricing, load shedding) and beforehand at predefined prices (priority service, hedging).

Retail tariff and spot prices

Price-based demand response enables electricity suppliers to offer customers time-varying rates that reflect the wholesale cost of electricity in different time periods. This information is expected to enable customers to use less electricity at times when energy is costly.

(1) Remerciements : cette recherche a bénéficié du soutien du Centre énergie et climat de TSE et de l'ANR 17-EUR-0010 (« Investissements d'avenir »).

Spot pricing

When the electricity supply is competitive, the wholesale spot price continuously reflects the marginal cost of the power system. Then, if consumers must pay kilowatt-hours at the spot price and buy electricity accordingly, the quantity produced and consumed at each moment is the one that maximizes social surplus. The spot price also covers the generation cost and the capacity cost of all operating power plants.

For this to work, consumers must be aware of the high variability of prices and be able to respond to this variability. It requires smart meters to register individual hourly consumption and to provide dynamic billing instead of the usual cumulative bill at a price that does not depend on the consumption time. However, smart meters are not sufficient. Except for large industrial and service customers, most consumers are unable to react very quickly to price variations, especially if they are not present at the consumption location. Consumers who sign retail contracts at spot prices must install smart appliances, for instance, Internet of Things (IoT) devices, programmed to provide the requisite level of services given the market signals conveyed by prices. Yet these standby and command/control devices themselves consume energy. The net balance in terms of saved kWh can therefore be quite low for households but high for industrial consumers. In financial terms, the gains from buying at spot prices rather than at a non-contingent price depend on the variance in spot prices, the duration of peaks, and the reliability, efficiency, and cost of the smart in-house appliances.

Weak forms of spot prices

To make demand more sensitive to wholesale prices without the drawbacks of hourly variations, electricity suppliers can propose soft forms of time-dependent prices. In “real-time pricing”, different price levels apply to different time periods on an hourly or sub-hourly basis. “Critical peak pricing” (or “passive demand response”) is a contract with a default constant price set for all but a limited number of days per year, chosen by the seller after the contract is signed, and during which the per-unit price increases significantly. In “Time-of-Use pricing”, instead of a single flat rate for energy use, rates change for broad blocks of hours. The price for each period is pre-determined and constant.

All these contracts are less demanding in terms of digitalization because customers are expected to adapt their consumption only in periods of energy stress. A simple piece of software with an on/off switch can do the job. But what is saved in transaction costs is lost in terms of efficiency.

Load shedding

With load shedding, the customer buys the right to withdraw a given quantity (the baseline) at a given price, and the option to sell unconsumed kWh on the wholesale market in competition with other bidders, be they producers or consumers of electricity with the same type of contract.

Even though digitalization can help rights holders decide whether to consume or to sell the contracted kWh, load shedding can be an individually profitable solution only for large consumers. As regards residential and small business consumers, aggregators propose to act as platforms that do the work for them against payment. The so-called “distributed load shedding” requires a connection to a central computer server and in-house command and control devices. This digital equipment basically entails a fixed cost, whereas the gains increase with the energy resold. Because of these economies of scale, there is no room for a large number of aggregators.

Priority service

Priority service is a form of demand management where consumers buy electricity power at a price that decreases as the probability of being disconnected by the provider increases. In practice,

priority service may take the form of a contract signed at a discounted price that allows the supplier to have the option to disconnect the customer.

In France, this type of “interruptible” service was created by the NOME Act (December 7, 2010) and is now incorporated into the Energy Code (Art. L.321-19). Candidates respond to a call for tenders issued by RTE, the transmission operator. Those selected sign a contract by which they accept interruptions decided by RTE when the normal functioning of the public transmission network is seriously and immediately threatened.

Priority service can be viewed as a particular form of market organization, which should be compared to the spot market. We have seen that for consumers to be able to participate in the latter, they should be able to observe instant prices and adjust their demand on an ongoing basis or have access to technologies allowing them to program their responses to all possible market fluctuations. Priority service achieves the same result at a lower cost by exploiting the fact that the optimal rationing rule corresponds to the order of priority dictated by consumers’ willingness to pay (Chao and Wilson, 1987).

The digital equipment necessary to implement priority service falls on the energy seller. Technically, it is very similar to the devices and programs used in distributed load shedding. However, the two types of contracts are backed by quite different financial instruments.

Greening the grid

To align with the objective of carbon neutrality by 2050 (“Green Deal”), the energy sector must be decarbonized. This requires that the use of electricity produced from renewable sources be stepped up, and that the demand be made more responsive to states of nature that affect the supply side.

Digital electric network

Governments promote wind and solar sources to produce electricity. But for a given installed capacity, the output of these sources varies cyclically and randomly. Moreover, the production plants are small compared with hydro, nuclear and fossil-fueled plants, and they are scattered and require an adaptation of the grid.

If the authorities achieve their goals for renewable energies and are able to close both thermal power plants, which generate greenhouse gases and local pollution, and nuclear power plants, which part of the population fiercely oppose, the need to develop technologies to store intermittent energy will become urgent. This will lead to an increase in costs even though renewables have low production costs, because transforming them into reliable electricity involves very high capacity costs. Moreover, this switch from intensive circulating-capital technologies to intensive fixed-capital technologies must be accompanied by digital enhancements. Given the scattering and versatility of renewables and the opportunism of individual and collective prosumers, balancing residual demand and residual supply and providing a last resort supply to prosumers requires the whole electric network to be backed by a material and immaterial digital network.

How can AI help?

With deep learning, algorithms can learn on their own by trial and error. They can help consumers by accomplishing simple tasks, such as the control of heating and air-conditioning systems, based on the number of people present in residential and commercial premises, and even with identity checks, thanks to facial recognition. In addition to these routine operations, AI can also help in combining customer preferences and consumption data with information on the tariff plans proposed by competing suppliers, to provide recommendations for the most suitable electricity contract. Upon acquiring more familiarity with customers’ habits, the system can automatically

switch energy plans when better deals become available, without interrupting supply (Hodson, 2013).

In many developing countries, the problem is quite different. The supply of electricity is plagued by power losses due to fraud and theft. In some places, this accounts for almost 50% of the injections into the grid. The so-called “non-technical losses” are mainly due to illegal bypassing of electricity meters. They damage the quality of the supplier/distributor’s services, jeopardize the safety of populations (fire hazard and electrical accidents), and provoke financial imbalances. Some operators have tried to fix the problem by relying on AI. For example, in Brazil, Enel Distribución Río deployed an anti-theft machine project for medium voltage customers (Siemens, 2021). The system uses digital meters and cellular communication networks to collect data on power use. AI is used to identify unusual patterns in relation to the profiles of customers located in similar areas, and to predict which customers are likely to have illegal connections.

Facing extreme events, it is less sure that AI can take the right decision because data on the consequences of catastrophes at local scale are very scarce. For example, during the winter storm of February 2021 in Texas, some consumers who had signed contracts with dynamic pricing received disproportionately high bills. With a wholesale hourly price equal to the regulated cap (\$US 9,000 per MWh instead of the expected \$US 25/MWh), embedded algorithms faced an event expected to be encountered only every 10 or 20 years. Depending on the consumer’s status (a hospital vs. a dancing hall), the wise decision (“to hedge or not to hedge”, Borenstein, 2021) should be taken from the initial programming, which is the opposite of machine learning.

Conclusion

The use of devices dedicated to energy savings cannot be profitable without a highly efficient software able to process a small sample of specific data extracted from a very large collection, and to adapt it to specific consumption objectives. Huge progress has been made in this area, but this is not sufficient to ensure successful digitalization of the energy sector. One reason is that current digital technologies rely heavily on the use of personal data, which raises privacy concerns that hinder their social acceptability. Addressing these concerns should therefore be a priority for policymakers who aim at encouraging the use of those technologies. Another reason is that the digitalization of the energy sector has made it a prime target for cybercriminals. Recent examples are the successful cyber intrusion into the European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) in April 2020 and the hackers who caused the US Colonial Pipeline to shut down in May 2021. The damages from these cyberattacks are amplified by the negative externalities stemming from the interconnections between energy networks in different areas or countries and those between IoT devices. These externalities imply that the private incentives to fight cyberattacks may be lower than the corresponding social incentives and, therefore, warrant public intervention.

References

- AURAY S., CAPONI V. & RAVEL B. (2019), “Price elasticity of electricity demand in France”, *Économie et Statistique / Economics and Statistics*, 513, pp. 91-103.
- BORENSTEIN S. (2021), “Texas, hedg’em”, *Energy Institute Blog*, <https://energyathaas.wordpress.com/2021/03/15/texas-hedgem/>
- BURKE P. J. & ABAYASEKARA A. (2018), “The Price elasticity of electricity demand in the United States: A three-dimensional analysis”, *The Energy Journal*, 39(2).

CHAO H. P. & WILSON R. (1987), “Priority service: Pricing, investment, and market organization”, *The American Economic Review*, 77(5), pp. 899-916.

EUROPEAN COMMISSION (2020), “European digital innovation hubs in digital Europe Programme”, draft working document: https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=62936

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2017), “Digitalisation and energy”, technology report, November: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>

HODSON H. (2013), “AI systems switch your energy bills to save you money”, *Newscientist.com*, January 13: <https://www.newscientist.com/article/mg21929315-200-ai-systems-switch-your-energy-bills-to-save-you-money>

KOOMEY J. (2019), “Estimating bitcoin electricity use: A beginner’s guide”, May, Coin Center report: <https://www.coincenter.org/app/uploads/2020/05/estimating-bitcoin-electricity-use.pdf>

SIEMENS (2021), “How smart tech ended Brazil’s power theft crisis”: <https://new.siemens.com/global/en/company/jobs/what-we-do/brazil-energy-crisis.html>

Les plateformes numériques d'échange d'électricité

Par **Thomas CORTADE** et **Jean-Christophe POUDOU**

Université de Montpellier

Introduction

Dans le cadre de la transition énergétique qui s'est amorcée au niveau mondial, les technologies de communication et les réseaux intelligents ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine énergétique. Le déploiement de plateformes pair-à-pair (P2P) d'échange d'électricité pourrait constituer une voie novatrice participant à cette transition. Le principe de ces plateformes est simple : typiquement, un petit industriel ou un résidentiel membre d'un micro-réseau électrique (*microgrid*), et connecté au réseau traditionnel (*backup*), peut produire sa propre électricité à partir de ressources énergétiques renouvelables distribuées à petite échelle (éolien ou photovoltaïque). Il peut l'autoconsommer ou la revendre *via* une plateforme numérique spécialisée et interconnectée, qui sert de fait de place de marché en ligne. Il peut si besoin en acheter auprès des autres membres. Ces nouveaux consommateurs-producteurs sont appelés "*prosumers*" ou « prosommateurs », et, en participant à ces plateformes P2P, peuvent constituer une communauté de fait, plutôt numérique qu'énergétique⁽¹⁾.

Ces plateformes d'échange P2P, présentées dans une première partie, ont émergé aux États-Unis et aujourd'hui en Europe, plusieurs expériences ont été lancées avec comme caractéristiques communes la constitution d'un micro-réseau et des échanges sécurisés *via* des protocoles de *blockchain*.

Les problématiques économiques des plateformes énergétiques, exposées dans une deuxième partie, emboîtent celles des P2P numériques telles qu'eBay, Uber, Le Bon Coin ou encore Airbnb. Des éléments communs à l'ensemble de ces plateformes existent : un rôle d'intermédiation de la plateforme, un meilleur suivi des acheteurs et des vendeurs *via* la technologie, la mise en place de prix flexibles ou basés sur des mécanismes sophistiqués de tarification. Mais certains défis et spécificités apparaissent et sont présentés dans la troisième partie.

Expériences et projets

En Europe et aux États-Unis, plusieurs projets ou expériences de solutions informatiques pour des plateformes d'échange P2P ont été menés d'abord au niveau de quartiers ou d'îlots urbains. C'est le cas de Piclo (RU), Vanderbron (Pays-Bas), SonnenCommunity et Litchblick Swarm Energy (Allemagne), Yeloha, Mosaic (USA)⁽²⁾. Cependant, des projets de micro-réseaux interconnectés plus intégrés mêlent plateforme d'échanges et plateforme numérique, à l'image de TransActive Grid (États-Unis) et Electron (Royaume-Uni). Pour ceux-là, l'ensemble des échanges repose sur la

(1) Pour une vue d'ensemble des communautés énergétiques, voir Caramizaru et Uihlein (2020), et Abada *et al.* (2020a) pour une analyse de leur viabilité.

(2) Une revue complète des projets est donnée dans Zhang *et al.* (2017), et IRENA (2020).

confiance, d'une part, et sur la sécurisation des transactions, d'autre part, en utilisant des relations contractuelles décentralisées qu'autorisent des technologies comme la *blockchain*⁽³⁾.

L'exemple de Transactive Grid, Brooklyn

L'objectif initial du micro-réseau de Brooklyn, lancé en 2015, était, d'un côté, de simplifier le système de comptage électrique et de facturation, et, de l'autre, de se prémunir contre des coupures de la fourniture d'énergie provoquées par un réseau de distribution dégradé à la suite de l'ouragan Sandy en 2012. Ce micro-réseau est un système décentralisé communautaire, développé par TransActive Grid, en *joint-venture* avec Lo3 Energy et ConsenSys.

Historique et objectifs

Ce projet de réseau a regroupé initialement cinq immeubles (environ 50 foyers) équipés de panneaux photovoltaïques, dont les *prosumers* interagissent selon un protocole d'échanges décentralisés de contrats intelligents, Ethereum, déployés dans une *blockchain*. Plus récemment, il a évolué vers une plateforme *web* appelée Exergy. Les clients utilisent des compteurs intelligents pour contrôler leurs données de flux bidirectionnels d'énergie, en se basant sur l'utilisation d'un réseau *blockchain* dit "*distributed ledger technology*" (DLT) pour le stockage et la validation des transactions énergétiques dans cet environnement P2P.

Fonctionnement⁽⁴⁾

Un système basé sur la DLT opère sans qu'une partie tierce intervienne dans la régulation des échanges d'énergie de pair-à-pair. Il repose sur trois éléments essentiels : les contrats intelligents, la cryptographie, et un mécanisme d'accord. Les contrats intelligents sont un ensemble de règles logiques (auto-exécutoire et auto-exclusif) préprogrammées permettant d'aboutir à un accord d'échange. La cryptographie permet la sécurisation des écritures et garantit la protection des données et des informations. Enfin, le mécanisme d'accord rend possible un échange décentralisé.

Ce système repose donc sur la technologie *blockchain* dont l'objectif est de garantir la transparence, l'intégrité, la fiabilité, l'immuabilité et l'évolutivité des échanges de façon décentralisée, comme le soulignent Zia *et al.* (2019). Les droits d'accès dans la DLT peuvent être publics ou privés, avec ou sans permission. En cas de droit d'accès public sans permission, tous les acteurs du réseau peuvent enregistrer et valider des transactions. À l'inverse, pour un droit public avec permission, seuls certains utilisateurs sont autorisés. Si les droits d'accès sont privés, un contrat d'appartenance pour accéder au réseau est nécessaire. Il existe alors un arbitrage entre permission et efficacité du système. En effet, sans permission, le mécanisme de transactions est plus transparent, mais moins efficace, car moins performant avec des coûts de calcul plus élevés. À l'extrême inverse, avec permission privée, il devient moins transparent, mais plus efficace. Ce processus permet alors de déterminer un prix d'équilibre de marché pour chaque transaction, en utilisant des informations en temps réel sur les offres d'achats et de ventes à l'intérieur du réseau électrique décentralisé.

Autres types d'expériences

À la suite du cas iconique de Brooklyn, un grand nombre de projets P2P ont été développés de par le monde, comme Yeloha qui avait pour objectif de créer un Airbnb du solaire, sans succès au final. Chacune de ces expériences détient des caractéristiques propres, notamment en termes

(3) Lansiti et Lakhani (2017) : la *blockchain* est « un registre ouvert et distribué qui peut enregistrer les transactions entre deux parties de manière efficace, vérifiable et permanente ». Pour une analyse très complète de cette technologie, voir le numéro de la série *Réalités industrielles*, en août 2017, « *Blockchains et smart contracts* : des technologies de la confiance ? ». Perez (2018) analyse aussi ses enjeux dans le secteur énergétique.

(4) Pour une description plus technique, voir Zia *et al.* (2019).

de mécanismes de valorisation des échanges, de modèle d'affaires, etc.⁽⁵⁾. Certaines ont démontré que les *prosumers* pouvaient réaliser des économies de facturation (jusqu'à 20 % en moyenne) lors d'échanges d'électricité avec des pairs, comme pour le projet allemand très ambitieux Lition testé en 2018 (GJETC, 2020).

Les micro-réseaux P2P constituent aussi des solutions d'électrification domestique dans les pays en développement, au Bangladesh, en Malaisie, ou encore en Colombie avec le projet Transactive Ernergy Colombia implémenté à Medellin. Le point-clé de ces projets est de relier des *prosumers* à faible revenu, équipés de toitures photovoltaïques, et des consommateurs plus riches mais non équipés. Au Bangladesh, la société Solshare a développé des solutions technologiques similaires, mais basées sur des objets connectés (*smartphones*). Enfin, des solutions plus globales ont été simulées comme en Espagne afin d'interconnecter deux micro-réseaux, Walqa et Atenea, distants de 135 km (au sein du consortium P2P-SmarTest) et organisés autour de laboratoires industriels de petites entreprises du tertiaire. Cela implique la prise en compte d'acteurs supplémentaires comme un agrégateur et des sociétés de services auxiliaires.

Justifications de l'émergence des P2P énergétiques

De prime abord, les *prosumers* sont incités à participer à des micro-réseaux, car ils évitent les coûts de connexion au réseau traditionnel⁽⁶⁾, mais, au-delà, la question se pose quant aux raisons, opportunités et mécanismes qui poussent ces acteurs à adopter ce nouveau type d'organisation décentralisée d'échange d'électricité.

Cadre légal

Tout d'abord, la législation a récemment évolué en faveur de ces modes d'organisation. En Europe, la refonte du règlement sur l'électricité (UE 2019/943), la directive sur l'électricité (UE 2019/944) et celle sur les énergies renouvelables (UE 2018/2001), autorisent des règles novatrices de consommation et d'échange d'électricité, en particulier la reconnaissance juridique des échanges pair-à-pair⁽⁷⁾. Au-delà de ces considérations légales, un certain nombre de justifications économiques sous-tendent l'apparition de ces P2P en électricité.

Une première justification puise dans les idées de l'économie du partage. L'avènement global des échanges P2P de services numériques (Uber, Airbnb, etc.) est source d'inspiration pour le domaine électrique. Krishnan *et al.* (2003) soutiennent que les réseaux P2P peuvent être perçus soit comme des biens publics, soit comme des biens de club. Les caractéristiques de tels biens impliquent que le design des plateformes d'échange est essentiel pour éviter l'écueil de l'effondrement de marché.

Une seconde justification repose sur la création d'une valeur sociale commune générée par les *prosumers* du fait d'échanges locaux plutôt qu'avec les fournisseurs d'énergie traditionnels. Cette valeur sociale s'apparente à de l'altruisme où chacun préfère consommer de l'énergie produite par un pair et savoir avec qui il l'échange. Wilkins *et al.* (2020) montrent au travers d'expériences que les participants développent des valeurs partagées et s'attachent à la compréhension du fonctionnement du P2P. Cette coopération tacite dans les échanges pair-à-pair implique un surplus économique plus important, pour les consommateurs et *prosumers*.

Un troisième argument est environnemental. La Commission européenne a annoncé, en avril 2021, un objectif de réduction nette d'au moins 55 % des émissions de gaz à effet de serre de

(5) Pour les principales, voir Kusakana (2021).

(6) Pour IRENA (2020), environ 41,1 % des coûts de l'électricité sont représentés par ceux du *grid*, et donc évitables lors de transactions locales P2P.

(7) Plus précisément dans les articles 2, alinéas 14, 15, 16, 18 et 2-2.a de la directive UE 2018/2001.

l'UE d'ici 2030, par rapport au niveau de 1990. Les échanges P2P électriques s'inscrivent dans cette dynamique puisqu'ils sont principalement basés sur des unités de productions décentralisées solaires ou éoliennes. Cet objectif environnemental est de plus renforcé par la réduction des coûts complets du renouvelable, et contribue donc à favoriser le développement de ces micro-réseaux et l'apparition de *prosumers*.

Enfin, le dernier argument est de nature technologique. Le développement des technologies telles que la *blockchain* rend possible les échanges décentralisés et automatisés essentiels à l'équilibre des offres et des demandes au sein des micro-réseaux, et ce sans intermédiaire (ou agrégateur), comme le notent Mengelkamp *et al.* (2018). D'autres objectifs sont atteignables *via* cette technologie, comme la maximisation des profits des *prosumers* ou la minimisation des coûts au sein du micro-réseau, ou encore la résolution d'éventuels problèmes de congestion et de défaillance.

Si les arguments précédents semblent importants, les intérêts personnels comme la valeur numéraire de l'énergie échangée et au minimum la rentabilité des investissements consentis par les *prosumers* sont aussi des éléments d'incitation non négligeables.

Les défis des P2P électriques

Si l'émergence des micro-réseaux P2P se comprend aisément, leur développement et leur mise en œuvre posent certaines questions et appellent plusieurs défis.

Le design des marchés P2P

Tout d'abord, les micro-réseaux énergétiques P2P sont affectés par les problématiques générales des P2P numériques, telles que Einav *et al.* (2016) les envisagent. Le design du marché P2P doit impérativement résoudre les questions d'appariements efficaces entre les *prosumers*. Cela contraint le processus de formation des prix qui repose sur des algorithmes sophistiqués, mais adaptés à l'architecture réelle du micro-réseau, comme l'indiquent Soto *et al.* (2021). Cette question est d'autant plus délicate que l'électricité implique des résolutions en temps quasi-continu pour égaliser offres et demandes, notamment si le système se veut autosuffisant. Des infrastructures de stockage sont ainsi nécessaires pour pallier les intermittences de la production, ainsi qu'un système d'information et de communication reliant les *prosumers* pour atténuer les problèmes de confiance réciproque. Ces services auxiliaires doivent être alloués au sein de l'infrastructure P2P sans perturber les mécanismes d'échanges, ce qui peut entraîner des surcoûts non désirés, ou bien l'intervention d'intermédiaires.

La formation des prix

Si la question de la formation des prix sur les plateformes numériques a été largement étudiée, notamment sous l'angle des marchés bifaces⁽⁸⁾, elle n'est qu'en partie transposable aux P2P électriques. En effet, les *prosumers* valorisent bien l'externalité d'appartenance au micro-réseau, mais, à la différence d'un marché biface traditionnel, ils valorisent moins l'externalité d'usage du fait de l'absence de différenciation du bien énergie. Ainsi, quel que soit le mécanisme de prix ou le modèle d'affaires implanté dans ces P2P, une motivation importante pour les *prosumers* à s'y engager est que l'électricité échangée à des pairs s'établira à un prix plus favorable que celui de *backup*. Cette propriété désirable n'est cependant pas forcément vérifiée⁽⁹⁾. En effet, l'électricité étant un bien homogène, le prix d'équilibre sera forcément ancré sur ce prix de *backup*.

(8) Pour une analyse complète, voir Rochet et Tirole (2003), et Weyl (2010).

(9) L'analyse de Cortade et Poudou (2021) montre que la valorisation intrinsèque des échanges P2P provoque un *markup* défavorable pour les *prosumers*, qu'ils soient acheteurs ou vendeurs à chaque instant.

Caractéristiques spécifiques

En tant que plateformes numériques, les P2P énergétiques présentent des caractéristiques spécifiques qui conditionnent leurs performances. Tout d'abord, la fourniture locale d'énergie comporte un risque inhérent à l'intermittence des énergies renouvelables dans la production distribuée. Les aléas météorologiques peuvent conduire certains *prosumers* à adopter des comportements opportunistes de "hold-up", en essayant de revendre à un prix exagéré. Ce risque est un frein au développement du micro-réseau, d'autant plus important qu'il se voudrait autosuffisant ou autarcique. La connexion au réseau traditionnel en *backup* atténue ce risque, mais réduit la valeur sociale des échanges locaux.

En conséquence, il existe un lien fort entre la réussite du P2P et la tarification de la fourniture du système de distribution traditionnel. Un risque « d'effet boule de neige » peut alors apparaître (comme dans le cas des communautés énergétiques, cf. Abada *et al.*, 2020b) : le développement des P2P énergétiques serait boosté par l'augmentation des tarifs d'accès au réseau électrique traditionnel due à la baisse des recettes d'accès consécutive à sa non-utilisation intermittente par les *prosumers*. Tous ces risques et comportements stratégiques pourraient altérer les incitations à investir dans des unités de production décentralisées dédiées au P2P, mais aussi à la marge dans la maintenance du réseau de distribution traditionnel⁽¹⁰⁾.

Conclusion

Le développement des micro-réseaux P2P est en cours. Néanmoins, leur multiplication nécessiterait un diagnostic public pour valider leur utilité sociale, et devrait s'accompagner d'une volonté politique qui permettrait de lever certaines barrières réglementaires. Dans l'exemple de Brooklyn, le cadre réglementaire n'a pas permis d'étendre les échanges P2P au-delà du micro-réseau, dans le réseau public de distribution. Il semble exister des inerties de natures économiques ou réglementaires empêchant l'avènement de l'Internet énergétique préfiguré par J. Rifkin en 2011. Selon lui, l'utilisation d'Internet permettrait de transformer le réseau électrique de tous les continents en un Internet énergétique, qui pourrait aider les ménages à revendre l'énergie excédentaire au réseau et à la partager avec les voisins, et au-delà.

Bibliographie

- AZIM M. I., TUSHAR W. & SAHA T. K. (2020), "Investigating the impact of P2P trading on power losses in grid-connected networks with prosumers", *Applied Energy*, 263.
- ABADA I., EHRENMANN A. & LAMBIN X. (2020a), "On the viability of energy communities", *The Energy Journal*, 41(1), pp. 113-150.
- ABADA I., EHRENMANN A. & LAMBIN X. (2020b) "Unintended consequences: The snowball effect of energy communities", *Energy Policy*, 143(1).
- CARAMIZARU A. & UIHLEIN A. (2020), *Energy communities: An overview of energy and social innovation*, Luxembourg, Publications Office of the European Union.
- CORTADE T. & POUDOU J.-C. (2021), "Peer-to-peer energy platforms: Incentives for prosuming", working papers, hal-03212480.

(10) Selon Azim *et al.* (2020), des pertes de puissance peuvent apparaître du fait des échanges P2P dans les micro-réseaux connectés au traditionnel.

- EINAV L., FARRONATO C. & LEVIN J. (2016), "Peer-to-peer markets", *Annual Economic Review*, 8, pp. 615-635.
- GJETC (2020), "Peer-to-peer electricity trading and power purchasing agreements", report.
- IRENA (2020), "Innovation landscape brief: Peer-to-peer electricity trading", International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- KRISHNAN R., SMITH R. & TELANG R. (2003), "The economics of peer-to-peer networks", *Journal of Information Technology Theory and Application*, 5(3), pp. 31-44.
- KUSAKANA K. (2021), "Optimal peer-to-peer energy sharing between grid-connected prosumers with different demand profiles and renewable energy sources", *IET Smart Grid*.
- LANSITI M. & LAKHANI K. R. (2017), "The truth about blockchain", *Harvard Business Review*, 95(1), pp. 118-127.
- MENGELKAMP E., GÄRTTNER J., ROCK K., KESSLER S., ORSINI L. & WEINHARDT C. (2018), "Designing microgrid markets: A case study: The Brooklyn Microgrid", *Applied Energy*, 210, pp. 870-880.
- PEREZ Y. (2018), « Blockchain et applications dans le secteur électrique : opportunités et boîtes noires », *Lettre de L'INSHS*, mai, pp. 36-38.
- RIFKIN J. (2011), *The Third Industrial Revolution; How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*, Eds Palgrave MacMillan.
- ROCHET J.-C. & TIROLE J. (2003), "Platform competition in two-sided markets", *Journal of the European Economic Association*, 1(4), pp. 990-1029.
- SOTO E. A., BOSMAN L. B., WOLLEGA E. & LEON-SALAS W. D. (2021), "Peer-to-peer energy trading: A review of the literature", *Applied Energy*, 283.
- ZHANG C., WUA J., LONGA C. & CHENG M. (2017), "Review of existing peer-to-peer energy trading projects", *Procedia Energy*, 105, pp. 2563-2568.
- ZIA M. F., BENBOUZID M., ELBOUCHIKHI E., MUYEEN S. M., TECHATO K. & GUERRERO J. M. (2020), "Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis", *IEEE Access*, 8, pp. 19410-19432.
- WEYL E. G. (2010), "A price theory of multi-sided platforms", *American Economic Review*, 100(4), pp. 1642-1672.
- WILKINS D. J., CHITCHYAN R. & LEVINE M. (2020), "Peer-to-peer energy markets: Understanding the values of collective and community trading", *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)*.

L'effacement diffus, métier numérique associant les consommateurs à la transition écologique

Par **Pierre BIVAS**

Ingénieur au Corps des mines, cofondateur de Voltalis

Durant son premier siècle, le succès de l'électricité a appelé de vastes investissements dans des « centrales » de production dimensionnées pour répondre à la demande. La tarification du kilowattheure (kWh) était entièrement guidée par son coût ⁽¹⁾ de production et d'acheminement.



Source : Pixabay

Désormais, la transition écologique requiert de nouvelles approches. D'une part, le kWh le meilleur (économiquement et écologiquement) est celui qui n'est pas consommé, et n'a donc pas besoin d'être produit ni acheminé. D'autre part, il faut toujours préserver l'équilibre du réseau, donc l'égalité entre production et consommation à tout instant, alors que se multiplient les sources de production renouvelable, à la fois décentralisées et intermittentes : il faut désormais piloter la consommation

en temps réel, pour, par exemple, la réduire quand il y a moins de vent et de soleil. À défaut, il faudrait recourir à des centrales d'appoint à carburant fossile qui se multiplieraient autant que les renouvelables. Et il faudrait aussi renforcer les réseaux, ce qui est coûteux, lent et suscite souvent l'opposition forte des riverains. Le pilotage de la demande est ainsi devenu indispensable à la transition écologique.

Techniquement, le pilotage de la consommation est rendu possible par le numérique, et le potentiel disponible croît avec la diffusion de nouveaux usages de l'électricité (pompes à chaleur, climatisation, mobilité électrique, etc.). Ce pilotage requiert cependant de nouveaux investissements significatifs en plateformes logicielles et en boîtiers installés chez les consommateurs. En contrepartie, il permet aux consommateurs équipés de réaliser des économies d'énergie, et à l'ensemble des consommateurs de mener une transition écologique à moindre coût.

Ce nouveau métier a été inventé il y a une dizaine d'années par la société Voltalis, en France, sous le nom d'« effacement diffus ». Il se déploie maintenant dans le monde entier comme un levier majeur de la transition écologique avec, et c'est à signaler, l'adhésion des consommateurs ⁽²⁾.

(1) Sous l'impulsion de Marcel Boiteux, élève de Maurice Allais (prix Nobel d'économie en 1988), la tarification de l'électricité monopolistique visait le coût marginal de long terme. Tout aussi efficaces doivent être les solutions à trouver aujourd'hui, dans un contexte de marché et surtout d'innovation, pour répondre aux nouveaux besoins d'une transition écologique rapide.

(2) À noter que les compteurs Linky ne jouent pas ce rôle, par conception. Pensé du point de vue du gestionnaire de réseau de distribution, ce projet devait d'abord réduire ses coûts opérationnels, et laisse de fait de côté la gestion de la demande en temps réel, assurée par l'innovation de Voltalis.

Pour le consommateur, participer à l'effacement diffus est simple et de bon sens. Il lui est évident qu'éviter de consommer aux heures les plus tendues est d'intérêt général, puisque cela évite des émissions de CO₂ et des pics de prix pour tous.

Pour cela, les boîtiers d'effacement diffus sont connectés par Internet à une plateforme capable d'en piloter jusqu'à cent millions de façon coordonnée en temps réel, pour mesurer et moduler la consommation de chacun, et la réduire globalement lorsque le réseau en a besoin. Le consommateur volontaire peut en être équipé pour participer, sans effort ni coût. D'une part, les coûts sont pris en charge par l'opérateur d'effacement diffus (rémunéré pour les bénéfices qu'il apporte à tous les acteurs économiques, comme on le verra). D'autre part, le consommateur fait des économies d'énergie, ce qui modère sa facture, de façon transparente pour lui. Il sait que son chauffage sera parfois mis en pause brièvement (ou sa climatisation, ou la charge de sa batterie), mais cela ne changera rien pour lui : car l'inertie thermique du bâtiment rend imperceptible une pause du chauffage pendant dix minutes ; de même, pour le chauffe-eau (ou la charge de votre véhicule électrique), il suffit que l'eau soit chaude pour votre douche du matin ou du soir (ou que la batterie soit pleine au moment du départ), qu'importe le moment précis où elle a été chauffée (ou rechargée). Et néanmoins, une petite pause du chauffage permet de faire une économie d'énergie ⁽³⁾. Au total, les ménages participants réalisent jusqu'à 15 % d'économies d'énergie, gratuitement, ce qui réduit d'autant leurs factures ⁽⁴⁾.



© Voltalis

Dès lors, on ne sera pas étonné que plus de 75 % des consommateurs auxquels Voltalis propose l'installation de son boîtier l'acceptent bien volontiers. Le lecteur se demandera peut-être même pourquoi il n'est pas déjà équipé. Bien sûr, cela suppose un domicile chauffé à l'électricité, climatisé, ou doté d'un point de charge de véhicule électrique : tel est déjà le cas de 7 millions de foyers en France, nombre qui va croître

encore avec la diffusion des nouveaux usages, par exemple des pompes à chaleur installées en remplacement de vieilles chaudières. Le potentiel dépasse donc 10 GW, soit la capacité de plusieurs EPR (mais pour un usage variable, non en base bien sûr).

(3) Le lecteur bénéficiant d'une robuste culture d'ingénieur objectera, comme l'auteur le fit en son temps, que l'énergie économisée sur le moment sera consommée plus tard : l'effacement ne serait qu'un report. Ce serait déjà bien : consommer au bon moment est déjà très utile, par exemple lorsqu'il y a du vent ou du soleil. Mais l'effacement diffus va plus loin : arrêter le chauffage dix minutes ne donne lieu qu'à un report infime, de l'ordre de 15 % de la consommation effacée à ce moment. L'essentiel (85 %) est bien économisé. Ce fait surpasse l'auteur lui-même, qui raisonnait implicitement « en régime permanent » sur un système optimisé. Mais les faits sont têtus : l'effacement bref est une petite perturbation dynamique, dans un régime lui-même variable, associant des constantes de temps longues (inertie du bâtiment) et une conduite vague (la consigne de température elle-même est peu précise, typiquement à 2°C près). Au total, la réalité s'est imposée : comme l'a montré par exemple une étude systématique réalisée sur 45 000 foyers publiée par RTE (gestionnaire du réseau de transport d'électricité en France), l'effacement diffus opéré par Voltalis est majoritairement une économie d'énergie (ce n'est pas le cas de l'effacement industriel, portant sur des consommations déjà optimisées).

(4) De tels résultats ne peuvent être obtenus avec des « incitations tarifaires » : il faut bien agir sur la consommation, et pas seulement la facturer, même cher. C'est pourquoi les compteurs électriques communicants n'apportent guère, pas plus en France, où leur déploiement se termine, qu'en Finlande où ils sont déjà déployés depuis dix ans, ni dans aucun autre pays. Là encore, l'effacement diffus est l'inverse de l'action de Linky et du mal nommé « effacement tarifaire » pesant sur les consommateurs. Ce dernier consiste à imposer des prix très élevés pendant de longues heures les jours les plus froids, mode opératoire brutal, qui expose les consommateurs à une explosion des factures ou à avoir froid, ce qui renforce encore la précarité énergétique des plus modestes.

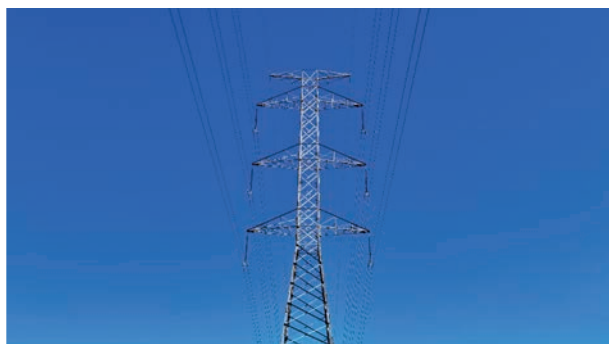
L'effacement diffus ouvre donc un gisement vaste et précieux d'économies et de flexibilité pour mener la transition écologique. Qu'attend donc la France pour équiper tous les ménages volontaires ? Et, au-delà, les bureaux, commerces ou bâtiments publics qui pourraient aussi participer ? Et n'y a-t-il pas là une politique européenne, à partir d'une technologie française ?

Certes, on l'a dit, il y faut des investissements, bien plus écologiques et économiques que pour la production – mais significatifs pour l'opérateur d'effacement diffus. Il faut donc trouver un cadre permettant de rémunérer ce métier, en lui attribuant une petite part des bénéfices qu'il apporte à tous, pour qu'il puisse financer son développement.

Pour cela, il suffit de se fonder sur les faits : ne pas consommer évite de la produire et de l'acheminer. Dès lors qu'il est piloté par un opérateur d'effacement diffus selon les besoins du système, l'effacement diffus constitue donc une ressource alternative aux centrales classiques, et un moyen d'alléger la charge des réseaux. Or ce moyen procure des gains à tous les autres acteurs. Pour les réseaux, il évite des congestions, donc des besoins de les renforcer. Pour les producteurs, il évite le besoin de centrales d'appoint, coûteuses et polluantes. Il en résulte des bénéfices pour l'environnement : paysages préservés, émissions évitées, meilleure utilisation des renouvelables. Mais ce n'est pas tout. L'effacement diffus permet de lisser la courbe de consommation, donc d'éviter les pics de prix : pour les fournisseurs, qui s'approvisionnent sur le marché, il en résulte une économie sur leurs achats. Par ailleurs, ils profitent de la baisse de la volatilité des prix sur le marché.

La planète, mais aussi chacun des acteurs trouvent donc bénéfice à la mobilisation de l'effacement diffus au sein du système électrique, et au total ces gains se cumulent pour bénéficier ultimement à tous les consommateurs.

Reste alors à canaliser une partie de ces gains pour rémunérer l'effacement diffus. Là encore, il suffit de repartir des faits : ne pas consommer évite de produire, c'est-à-dire que l'effacement diffus offre une alternative à la production. Effacement et production peuvent donc être mis en concurrence sur les marchés de gros de l'électricité. Ceci présente un double avantage. D'une part, cela incite les opérateurs d'effacement à suivre le « signal prix », c'est-à-dire à effacer, lorsque les prix sont élevés, ce qui en pratique reflète bien les besoins du système électrique. D'autre part, il en résulte un lissage des pics de prix, ce qui profite aux fournisseurs. Dès lors que le bénéfice pour tous les fournisseurs est supérieur au coût d'achat de l'effacement, il en résulte un bénéfice net pour eux, donc en dernier ressort pour tous les consommateurs.



Source : Pixabay

C'est selon ce principe que bien des pays ont tour à tour ouvert leur marché à l'effacement, tels les États-Unis en 2011 ou Singapour fin 2013. L'Union européenne a suivi par des textes proposés fin 2016 (au sein du « Paquet Énergie Propre pour tous les Européens ») et publiés en juin 2019. La France ne fut pas en reste – bien au contraire –, même si elle a pu s'attarder un peu en chemin.

Dès juillet 2007, RTE proposait d'expérimenter l'effacement diffus comme moyen d'ajustement de l'équilibre du réseau. Le principe de l'ajustement est simple : puisque l'électricité ne se stocke pas sur le réseau, il faut à tout instant ajuster production et consommation d'électricité. Telle est la mission de RTE : si la consommation croît plus que la production prévue, RTE ajuste en achetant

une production supplémentaire. L'effacement diffus offre une alternative : il suffit de trouver des appareils électriques à arrêter à tour de rôle, pour réduire au total la consommation et la maintenir ainsi au niveau de la production disponible. Effacement diffus et production d'appoint sont donc deux solutions alternatives pour l'ajustement ; à RTE de choisir la moins chère. Tel était le principe de l'expérimentation, qui fut un succès.

RTE proposa donc d'aller plus loin. D'une part, l'expérimentation fut pérennisée, et l'effacement diffus définitivement intégré au marché de l'ajustement. D'autre part, et surtout, RTE fit observer que les besoins de la France dépassaient largement le seul ajustement, par exemple lors des pics de consommation. Ces pics sont rares et brefs, mais pour les franchir, il faut bien des centrales, même si elles ne tournent que quelques heures de certains hivers. À moins de mobiliser alors l'effacement diffus. Plutôt que de construire et maintenir de telles centrales, le plus souvent inutiles – et polluantes lorsqu'on les utilise –, il suffit là encore « d'effacer le pic », en arrêtant des radiateurs à tour de rôle à ces heures de pointe.

En 2010, le rapport Poignant-Sido sur la pointe notait déjà qu'équiper les foyers français permettrait d'éviter 15 à 20 % de cette pointe ⁽⁵⁾. L'effacement fut donc d'emblée intégré à la construction du mécanisme de capacité mis en place pour couvrir les pointes ⁽⁶⁾. Puis des objectifs de développement des capacités d'effacement furent fixés par la Programmation pluriannuelle de l'énergie, dès sa première édition en 2016 : il s'agissait d'atteindre 5 GW en 2018 et 6 GW en 2023. Ces objectifs ont été renouvelés et inscrits dans la loi en 2019 : 4,5 GW en 2023 et 6,5 GW en 2028 – car ils étaient et demeurent loin d'être atteints. Pourquoi ? Il est intéressant d'examiner ce cas, au-delà même des mérites d'une solution numérique innovante, illustration de la difficulté parfois de traduire des objectifs politiques clairs dans la réalité.

Car, pour ce qui est de développer l'effacement diffus, la volonté politique s'est bien exprimée. Le législateur ne s'est en effet pas contenté d'intégrer l'effacement au mécanisme de capacité, mais en a tiré les conséquences. Ce mécanisme vise à s'assurer de la disponibilité de capacités, d'effacement ou de production, pour passer les pointes. Mais il ne suffit pas que les capacités soient disponibles : encore faut-il qu'elles soient activées. Il fallait donc permettre l'achat de l'effacement sur les marchés, c'est-à-dire non plus seulement pour l'ajustement par RTE au dernier moment, mais bien aussi sur le marché de gros, en amont, et pour des volumes bien plus vastes, au même titre que la production d'électricité. C'est bien ce qu'ont prévu dès 2012 une loi française ⁽⁷⁾ ainsi d'ailleurs qu'une directive européenne ⁽⁸⁾.

La France et l'Europe ne sont – logiquement – pas seules : on l'a dit, c'est aussi ce qu'avait prévu la FERC aux États-Unis par une décision de mars 2011 ⁽⁹⁾. Cette décision fut d'emblée contestée par l'association des producteurs d'électricité américains, peu désireux de cette concurrence venant des consommateurs, et leur donnant un pouvoir de marché pour faire baisser les prix. Car tel est bien l'effet de l'effacement sur le marché : si certains consommateurs, *via* un agrégateur, proposent de s'effacer lors de périodes chargées pour éviter le recours à des productions chères, cela fait baisser les prix du marché de gros, donc les coûts d'approvisionnement pour tous. Dès lors que le bénéfice procuré par l'effacement est supérieur à son coût, il en résulte un bénéfice net pour tous les fournisseurs, qu'ils peuvent répercuter à tous les consommateurs. Ce gain net pour

(5) Ordre de grandeur qu'on trouve aussi par exemple aux États-Unis (*cf.* étude publiée par la FERC – Federal Energy Regulatory Commission – en 2008), et qui va croître avec l'électrification de nouveaux usages dans la plupart des pays.

(6) Prévu par la loi NOME en 2010, le mécanisme de capacité s'appliqua à partir de l'année 2017.

(7) Article 14 de la Loi n°2013-312 du 15 avril 2013 dite « loi Brottes ».

(8) Article 15 (8) de la directive 2012/27/UE du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique.

(9) <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-06/Order-745.pdf>

tous les consommateurs est l'argument par lequel la FERC justifia sa décision, et que valida ⁽¹⁰⁾ la Cour suprême.

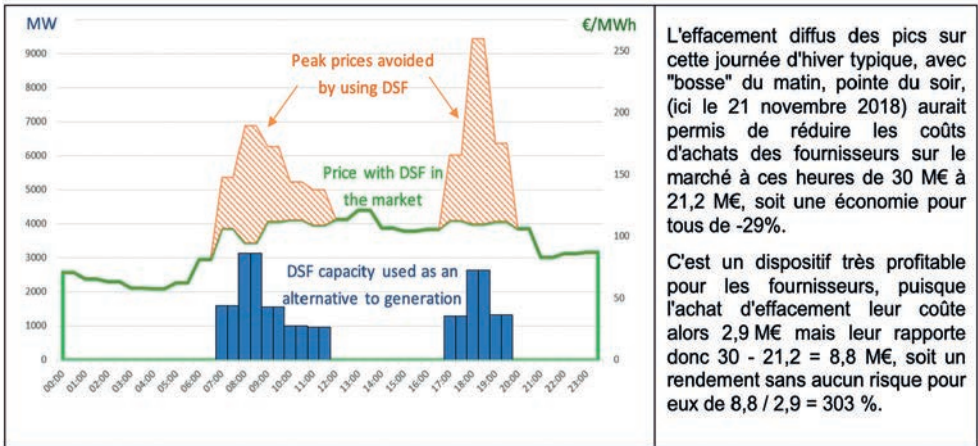


Illustration du bénéfice que procurerait l'effacement des pics une journée d'hiver en France

© D.R.

En France, l'opérateur historique s'opposa lui aussi à l'ouverture du marché à l'effacement, mais par un moyen détourné. Pour cela, il exigea que les « coûts » de l'effacement lui soient compensés... par l'effacement lui-même. De fait, ouvrir le marché de gros à l'effacement signifie que l'effacement y est vendu, ce qui constitue un coût pour ceux qui l'achètent, à savoir les fournisseurs. L'effacement remplace l'achat d'une production plus chère, mais ne permet pas de facturer les consommateurs qui sont effacés. L'effacement constitue donc bien un coût pour les fournisseurs. Néanmoins, il leur procure aussi des bénéfices, comme on l'a vu, en faisant baisser les prix de gros. Le bénéfice pour les fournisseurs est plusieurs fois supérieur au coût de l'effacement comme l'illustre le chiffrage ci-dessus. Mais l'opérateur historique est déterminé à occulter ces bénéfices ⁽¹¹⁾, et ne considérer que les coûts de l'effacement, pour en demander la compensation par l'effacement lui-même.

Autrement dit, la vente sur le marché procure des revenus à l'effacement, qu'il devrait ensuite rembourser. Un tel prélèvement empêcherait de fait l'accès au marché, bloquerait ce nouveau métier, et priverait par conséquent les fournisseurs et ultimement les consommateurs de tous les bénéfices de l'effacement diffus.

À rebours de l'évolution initiée aux États-Unis, tel est bien ce qui fut imposé à l'effacement en France. Les chiffres publiés par RTE confirment l'efficacité de cette barrière : après des années de prétendue ouverture du marché, les volumes d'effacement offerts ne décollent pas, et même décroissent ⁽¹²⁾.

Cependant, le politique, notamment par la voix du législateur, a plusieurs fois confirmé son souhait de voir l'effacement se développer. Constatant que la loi de 2013 était « effacée » par

(10) https://www.supremecourt.gov/opinions/15pdf/14-840-%20new_o75q.pdf

(11) L'opérateur intégré refuse de prendre en considération ces bénéfices nets pour les fournisseurs, donc ultimement pour les consommateurs, car il est lui-même producteur : la baisse des prix du marché de gros réduit d'autant ses marges. Là encore, il occulte les économies que l'effacement lui permet en rendant inutiles les centrales d'appoint, qui sont pourtant structurellement un centre de coûts. Au fond, l'effacement diffus heurte l'opérateur historique, qui cherche à justifier l'augmentation des prix, plutôt que de donner aux consommateurs les moyens de les réduire. Jusqu'à ce qu'il soit lui-même prêt ?

(12) <https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/mecanisme-marches-effacements/>

ce prélèvement, et non appliquée ⁽¹³⁾, il la reprit dans la loi de 2015 ⁽¹⁴⁾, avec un dispositif visant expressément à supprimer ce prélèvement sur l'effacement diffus. Cette loi a encore été effacée : ce dispositif n'a jamais été mis en œuvre. Puis intervint la directive européenne 2019/944, renforçant celle de 2012, et adoptée sur ce point avec le soutien unanime du Parlement européen et même, au Conseil, celui de la France. Mais là encore, serait-on tenté d'écrire, qu'importe à l'opérateur historique.

À ce stade, au lieu de supprimer la barrière imposée jusqu'ici en France et désormais interdite par cette directive, une ordonnance prise en principe pour sa transposition a au contraire pérennisé et rehaussé le prélèvement sur l'effacement, en supprimant le dispositif prévu par le législateur français en 2015. Dès lors, comment atteindre en matière d'effacement les objectifs de la PPE (Programmation pluriannuelle de l'énergie), repris dans la loi ⁽¹⁵⁾ en 2019, et faisant désormais partie des engagements de la France pour le climat ?

Le politique a retenu une nouvelle voie, consistant à organiser des appels d'offres pour rémunérer les capacités d'effacement. Cette solution est peut-être moins immédiate que *via* le marché, en ce qu'elle lie moins directement le prix payé pour l'effacement aux bénéfices qu'il procure aux consommateurs. Elle doit néanmoins permettre de construire les capacités d'effacement diffus dont la France a besoin. Il faudra pour cela calibrer les appels d'offres selon une logique économique de long terme, comme on savait le faire quand il s'agissait de déterminer une tarification efficace des investissements de production : l'investissement dans l'effacement diffus est une activité durable, avec un horizon décennal conforme aux objectifs climatiques à 2030, et au-delà. Il s'agit d'accompagner efficacement la transition écologique et l'essor des renouvelables, en mobilisant à grande échelle les ressources du numérique et un savoir-faire qui suscite l'adhésion des consommateurs, et dont la France peut être fière.

(13) Selon les termes de son auteur, qui, auditionnant le président de la CRE à l'Assemblée nationale le 11 septembre 2014, indique : « S'agissant de l'effacement, je suis déçu que la volonté du législateur – exprimée dans la loi du 15 avril 2013 [...] – de favoriser les mégawatts non consommés se soit traduite par une rémunération de ceux qui ne vendent pas les kilowatts qu'ils espéraient vendre. Ce détournement de la lettre et de l'esprit de la loi nous conduira à la retravailler. [...] Cela nous permet de voir comment les lois que nous votons s'appliquent ou pas : on peut donc les effacer... » : <http://www.assemblee-nationale.fr/14/cr-cstransener/13-14/c1314008.asp>

(14) Article 168 de la loi 2015-992 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

(15) Article L.100-4 du code de l'énergie.

Le numérique, facteur de succès de la mobilité électrique

Par **Jean-Rémy GAD**

Président de TMS, expert judiciaire près la cour d'appel de Bordeaux
et **Marc MOREAU**

Fondateur de Ville et Mobilité de Demain

Un contexte favorable au véhicule électrique

Alors que les transports représentent plus de 20 % des émissions mondiales de CO₂ selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie), et plus de 30 % de celles en France selon le CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique), le passage à une mobilité de très faible émission est un enjeu majeur. L'électricité, avec l'hydrogène, fait partie du mix de solutions pour y parvenir.

Les obligations légales et les mesures d'aide en ce sens se multiplient. Pour la France, ce cadre favorable vient principalement de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), et de la Loi d'orientation des mobilités (LOM).

Côté achat, la LOM impose aux entreprises et aux administrations une part minimale, qui atteindra 50 % en 2030, de véhicules à faibles émissions lors des renouvellements de flotte. La mise en place de zones à faibles émissions (ZFE), où certaines catégories de véhicules sont interdites d'accès, accroît l'incitation. Le gouvernement a en contrepartie mis en place différentes aides : prime à la conversion, bonus écologique...

Concernant les infrastructures de charge, la loi impose l'équipement en bornes dans les bâtiments neufs ou rénovés. Cette obligation est accompagnée de différentes formes de subventions, notamment la prime Advenir, qui peut atteindre 60 % du coût quand il s'agit d'installations ouvertes au public.

Cet environnement, associé à une communication intense des constructeurs, a créé un engouement pour les véhicules électriques et hybrides, dont les ventes ont fortement augmenté en 2020, puisque 110 000 véhicules légers ont été immatriculés, soit plus du double de l'année précédente selon Avere-France (Association nationale pour le développement de la mobilité électrique).

Les Zoé, E-208 et compagnie ne doivent pas masquer les autres véhicules. Les deux roues sont aussi électriques, tels les scooters, trottinettes et vélos à assistance électrique (VAE), dont les ventes et locations ont été boostées par la crise du Covid-19.

L'électrification concerne enfin les bus, dont se dotent les agglomérations comme Orléans ou Brest, et même les camions, dont les premiers modèles ont démarré leurs tests chez Volvo Trucks ou Renault Trucks, ou de nouveaux entrants comme Thor Trucks.

Cette effervescence attire une multitude d'acteurs le long de la chaîne de valeur, du côté des fabricants de véhicules avec leurs sous-traitants fournisseurs de batterie et équipementiers, et du côté des fournisseurs d'énergie et d'infrastructures de recharge (fabricants de bornes, bureaux d'étude, installateurs, opérateurs de service).



Bus électrique Heuliez à Lorient (crédit photo Semvatac)

Une stratégie de déploiement à affiner

L'analyse montre quelques freins à un usage généralisé.

La plupart des charges (80 % environ) se font à une puissance modérée (de 3 à 7 kW/h), à domicile (en pavillon) ou au travail. Ceci est dû à une offre de charge limitée dans les métropoles, où se concentrent la majorité des véhicules électriques, et à un usage quotidien dans le cadre de déplacements domicile-travail.

Cela satisfait la majorité des possesseurs actuels de véhicules électriques qui disposent d'une place de stationnement attitrée munie d'une borne de charge. Ils n'utilisent donc les infrastructures de charges publiques que comme solution de secours ou dans le cadre d'un déplacement non prévu.

Mais tous les propriétaires de véhicules n'ont pas une place de stationnement attitrée. Les nouveaux acquéreurs sont donc en attente d'équipements publics de recharge, non plus en tant que solution de secours, mais en tant qu'offre primaire, un peu selon le principe d'une station-service.

Face à ces demandes, l'offre de charge publique est encore peu adaptée aux attentes des usagers. Les opérateurs (syndicat d'électrification et métropoles) ont développé des infrastructures :

- implantées dans des endroits où la fréquentation n'est pas au rendez-vous (petites villes dans une offre départementale ; autoroutes alors que l'autonomie des véhicules reste encore limitée) ;
- ne permettant pas de charger à une vitesse intéressante l'ensemble du parc automobile (notamment en provenance d'Allemagne et du Japon), mais plutôt adaptées aux petits modèles (Zoé et Smart) à 22 kW/h en courant alternatif.

Quelques rares métropoles (Bordeaux, Toulouse, Paris) ont joué le jeu en développant une infrastructure pour tous (AC/DC), avec une vitesse de charge cohérente n'immobilisant pas les véhicules trop longtemps. Ce type d'équipements répond aussi aux besoins des zones rurales, où les distances parcourues sont plus importantes.

Un dernier frein tient au modèle économique, car beaucoup d'offres ont vu le jour sur un modèle de gratuité ou selon des prix n'intégrant que le coût de l'énergie. Cette pratique est certes utile



Véhicule en charge (Source : TMS)

pour permettre l'essor d'une offre, mais occulte de façon trompeuse les investissements et les coûts d'exploitation et de maintenance, ainsi que les coûts d'animation d'un service dans le cadre d'une société privée.

Pourtant, à ce jour et sans fiscalité additionnelle, sur des territoires de la taille d'une grosse métropole, il est possible de financer les installations principalement rapides et leur exploitation dans un service payant, offrant à un opérateur la possibilité de trouver un équilibre économique à mi-vie sur un contrat d'exploitation d'une dizaine d'années.

En réponse aux usages actuels et aux attentes prévisibles, on pourrait alors fournir un service de qualité aux futurs acquéreurs dans une offre de charge quotidienne, en équipant entreprises, copropriétés, grands axes de circulation, métropoles. Il faut exploiter pour cela la réserve substantielle de place dans l'espace public et dans les copropriétés non encore équipées.

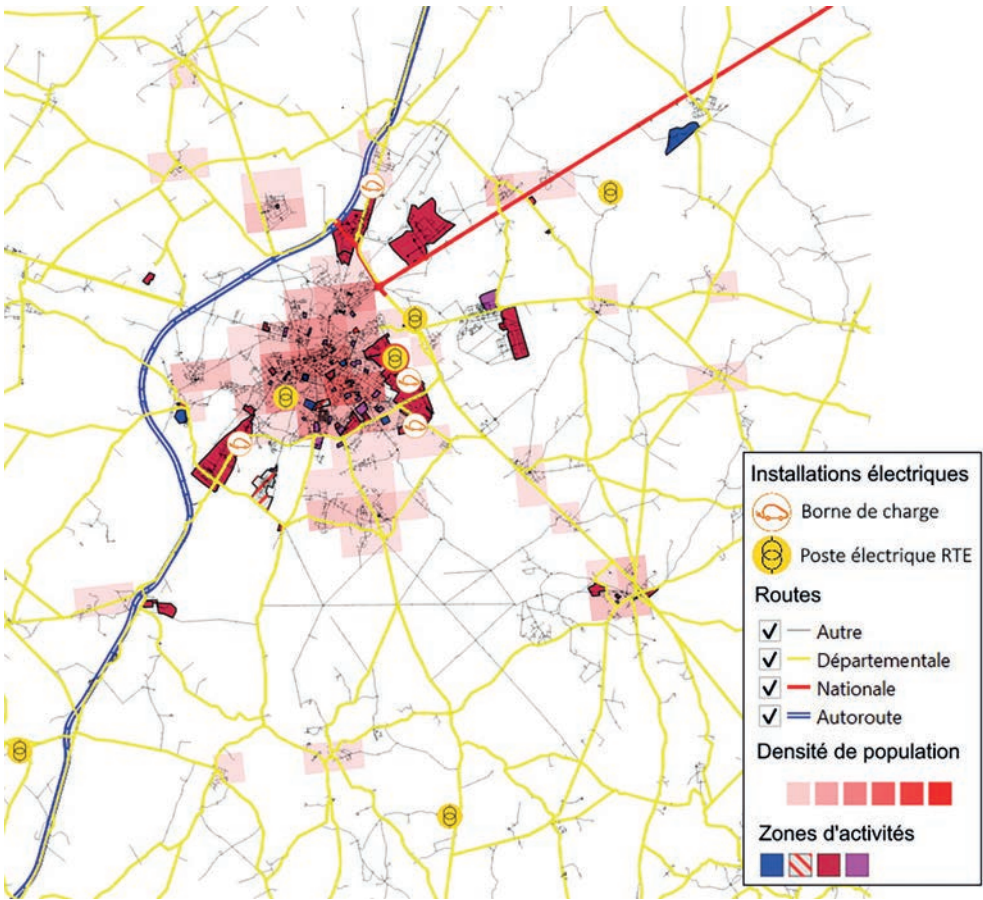
Le numérique pour penser la mobilité électrique sur le territoire

Déployer une offre de charge plus adaptée est évidemment le souci des opérateurs comme Izivia, ou celui des autorités organisatrices de mobilité associées « à l'élaboration des schémas directeurs de développement des infrastructures de recharge », selon la LOM.

Le numérique se révèle indispensable en amont pour poser la stratégie de déploiement de la charge sur le territoire grâce à une analyse de données et une prévision des usages, comme c'est le cas pour planifier un réseau de transport.

La demande doit être évaluée en prenant en compte tous les usages et types d'utilisateurs (particuliers, mais aussi taxis, flottes d'entreprise...), les profils d'usage, variant en fonction de chacun et pouvant être évalués à partir des données statistiques (mobilité, caractéristiques socio-démographiques locales) et d'enquêtes plus ciblées. Cette demande doit évidemment être projetée sur le long terme... avec les incertitudes liées à une pratique émergente !

Cette demande se décline ensuite en nombre de points de charge nécessaires, mais aussi en caractéristiques de charge (puissance, alimentation, prise...). Ces points doivent être répartis sur



Analyse territoriale pour le véhicule électrique (Source : Ville et Mobilité de Demain)

le terrain en tenant compte à la fois des zones de chalandise pour attirer le maximum d'utilisateurs, des projets existants pour ne pas faire de concurrence inutile, et des contraintes, telles que l'espace disponible (surface, sous-sol...), les possibilités de raccordement au réseau, ou les sources d'énergie locales. Des critères économiques permettent enfin de vérifier l'équilibre économique du projet, et de définir un plan de déploiement et d'exploitation sur cinq à dix ans.

Des outils numériques commencent à voir le jour pour instrumenter cette démarche en exploitant le potentiel des données ouvertes, les caractéristiques des systèmes existants, les retours d'expérience des premiers déploiements, etc. La simulation aide ensuite à tester des scénarii et dimensionner les installations. C'est par exemple le cas de l'outil « PrédiBornes », développé par un des auteurs et qui permet de modéliser le déploiement d'infrastructure et les équilibres économiques.

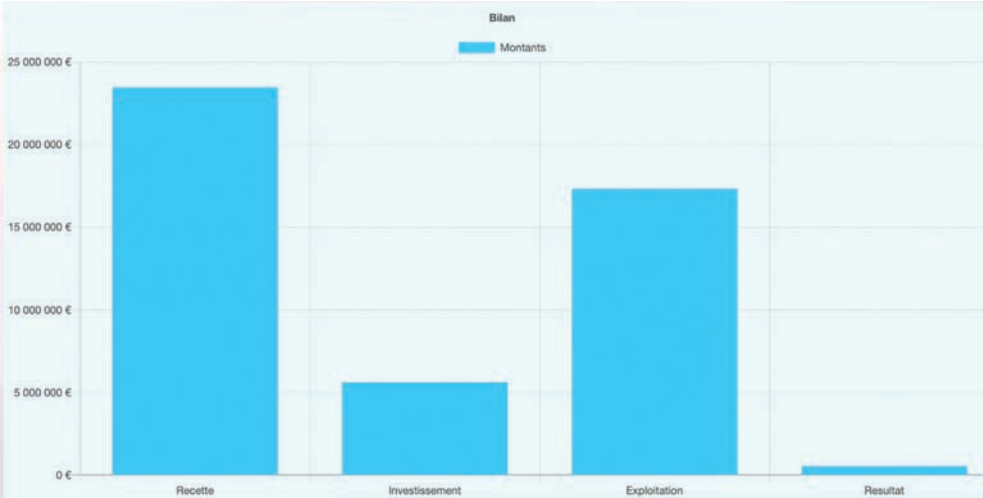
Le numérique au service de l'expérience client

Le succès de la mobilité électrique viendra évidemment des clients, et le numérique a là aussi un rôle essentiel à jouer.

Dans un contexte où les bornes de charge sont encore peu nombreuses et les systèmes de paiement et de branchement ne sont pas tous interopérables, le premier frein à la mobilité électrique concerne l'incertitude quant aux possibilités de recharge pour 52 % des Français, selon le baromètre de la mobilité réalisé par EVBox et Ipsos en 2020.

Bilan général												
Déploiement infrastructure		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Besoin		Rapides	17	19	22	25	28	33	38	43	51	51
		Normales	32	36	40	46	53	60	70	81	94	94
Parc		Rapides	5	19	22	25	28	33	38	43	51	51
		Normales	17	36	40	46	53	60	70	81	94	94
Achats (CAPEX)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Total des aides		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	
Reste à financer		992,000 €	1,230,000 €	272,000 €	336,000 €	416,000 €	416,000 €	560,000 €	640,000 €	752,000 €	0 €	
Exploitation (OPEX)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Exploitation Technique (Maintenance + SI infra)		108,670 €	214,147 €	239,468 €	281,079 €	317,773 €	350,772 €	413,374 €	480,723 €	538,393 €	549,202 €	
Gestion société et Clients		645,818 €	667,756 €	690,997 €	715,704 €	742,071 €	770,323 €	800,732 €	833,616 €	869,353 €	908,396 €	
Energie		287,438 €	330,262 €	373,813 €	425,559 €	487,008 €	559,426 €	646,063 €	748,978 €	871,561 €	1,011,342 €	
AMO		150,000 €	75,000 €	37,500 €	25,000 €	25,000 €	25,000 €	25,000 €	25,000 €	25,000 €	25,000 €	
Recette Commerciale		1,061,769 €	1,229,570 €	1,428,177 €	1,663,527 €	1,942,724 €	2,274,267 €	2,668,334 €	3,137,108 €	3,695,178 €	4,360,020 €	
BILAN GENERAL		-1,122,156 €	-1,267,594 €	-185,600 €	-119,815 €	-45,128 €	152,746 €	223,165 €	408,791 €	638,871 €	1,866,080 €	

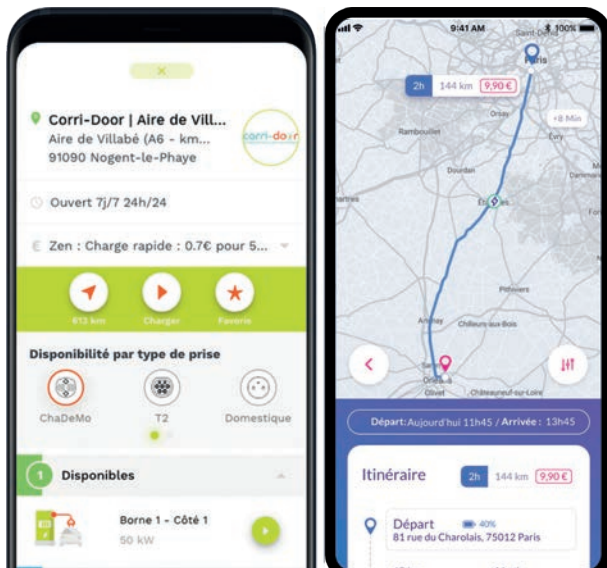
Recette	23,460,676 €
Investissement	5,614,000 €
Exploitation	17,317,315 €
Resultat	529,361 €



Le logiciel « PrédiBornes » (Source : TMS)

Les applications mobiles fournies par les opérateurs de charge (Izivia, Freshmile...) permettent de répondre à cette inquiétude en recherchant des bornes compatibles, en vérifiant leur disponibilité et en déterminant le meilleur trajet pour s’y rendre. Certaines comme « Free2Move » peuvent même planifier un itinéraire longue distance en prenant en compte l’autonomie du véhicule.

Le numérique joue ensuite un rôle-clé dans le parcours client pour faciliter le paiement par badge, par carte bancaire ou *via* l’application. Plusieurs approches coexistent. L’écosystème fermé est exceptionnel, essentiellement le fait de Tesla qui déploie son propre réseau « Superchargeurs », dans une logique haut de gamme qui rappelle celle d’Apple. La tendance la plus répandue est celle d’un fonctionnement en plateforme, où des places de marché B2C (*business to consumers*) donnent accès aux bornes de différents réseaux partenaires dans un système de *roaming*. Elles garantissent ainsi à leurs clients un accès maximal à une solution de charge où qu’ils soient. Ce *roaming* est facilité par des intermédiaires comme Gireve qui offre une place de marché et une plateforme d’interopérabilité entre opérateurs.



Exemples d'interface utilisateur de CorriDoor et Free2Move (D.R.)

par simple branchement du câble de recharge sur la borne, et la charge démarre sans nécessiter d'authentification avec un badge ou une application mobile.

Le numérique garant de la performance du système électrique

Pour les acteurs de la production et de la distribution d'électricité, ce déploiement de la recharge pour des véhicules de toutes tailles ouvre un vaste marché, mais pose des problèmes nouveaux : nouveaux profils de consommation, appels de charge importants, temporaires et inopinés pour la charge rapide de véhicules légers, ou importants et prolongés pour les parcs de véhicules de société qu'il faut recharger dans la nuit.

Le numérique intervient pour assurer la bonne intégration au réseau local et le bon fonctionnement du service. Les compteurs connectés de type Linky installés sur les points de charge publics ou privés fournissent une information précise sur les profils de consommation, et permettent d'affiner les modèles de prévision. Des capteurs communicants et des réseaux télécoms de type 5G donneront lieu de mieux connaître l'état et la sollicitation du réseau en temps réel. Une gestion intelligente (*smart grid*) est alors possible en pilotant la charge et le stockage d'énergie.

Le plus simple est le pilotage temporel pour décaler la recharge aux heures creuses. Un deuxième niveau est le pilotage de puissance pour moduler la charge grâce à une négociation automatique entre le réseau électrique et la borne, afin de baisser la puissance (effacement) en cas de pic de consommation ou au contraire de l'augmenter pour absorber une surproduction issue des énergies renouvelables. L'étape ultime consiste à piloter la charge mais aussi la décharge pour utiliser ponctuellement le véhicule comme une source d'énergie : c'est le V2B (*vehicle to building*), voire le V2G (*vehicle to grid*) si on demande au véhicule de restituer par moment de l'énergie au réseau. Ces deux dernières méthodes nécessitent un pilotage intelligent tenant compte des besoins et des objectifs du client (niveau minimal de charge souhaité, heure de départ prévue...). C'est tout l'enjeu du projet aVENir financé par l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) depuis 2019, et qui rassemble les grands acteurs du secteur.

Si la plupart de ces plateformes B2C, en général opérées par des opérateurs de charge (Freshmile, Shell Recharge...), recherchent une couverture nationale ou internationale, certaines ont au contraire une logique territoriale. C'est le cas de « Pass Pass Électrique » dans les Hauts-de-France, qui intègre la recharge dans un bouquet plus large de services locaux de mobilité, mis en place par la région et accessibles avec la carte Pass Pass dans une logique de *Mobility-as-a-Service* (MaaS).

D'autres innovations numériques viennent encore fluidifier l'expérience utilisateur, tel le « Plug & Charge » déjà disponible chez Tesla : le véhicule est reconnu

Lorsque l'on s'intéresse non pas à des véhicules individuels mais à tout un parc (comme les 180 bus électriques qu'Orléans doit acquérir d'ici 2024), on envisage l'énergie énorme qu'il faut apporter dans la nuit, et des algorithmes d'optimisation vont assurer, sous contrainte de la puissance disponible et en minimisant le coût, la charge de chaque bus, en tenant compte des heures de retour au dépôt le soir et de départ prévues le lendemain.

Il existe des solutions alternatives, comme celle déployée sur le territoire Bayonne-Biarritz, avec des véhicules équipés de super-condensateurs d'une capacité plus faible, se chargeant sur des pantographes en bout de chaque ligne. Cette solution augmente la capacité de transport du bus en réduisant le poids des batteries et lisse l'appel de puissance sur une journée sur un territoire, au lieu de focaliser en un seul lieu un besoin d'énergie énorme. En outre, les investissements et les coûts opérationnels sont plus faibles.

Toutes ces stratégies permettent de développer de la flexibilité dans la consommation d'énergie, de limiter les pics de puissance et donc de garantir le bon fonctionnement du système électrique, tout en évitant des investissements supplémentaires pour surdimensionner le réseau ou les moyens de production.

Et demain ?

On peut raisonnablement s'interroger sur la place du véhicule électrique dans les foyers après 2020. Les années 2010 ont vu un positionnement en tant que second véhicule d'un foyer typiquement urbain pour des usages quotidiens de 30 km, ou périurbain pour des usages pendulaires.

Mais les constructeurs, qui ont investi massivement pour passer d'une plateforme thermique à une plateforme électrique, ne souhaitent pas se cantonner à ce marché restreint. Nous connaissons donc dans les années 2020-2025 l'essor d'une offre de véhicule principal du foyer avec des véhicules électriques de belle autonomie (500 km), permettant de faire voyager une famille complète.

Tesla, suivie à ce jour par l'ensemble des constructeurs, a ouvert ce bal au début des années 2010, en comprenant qu'un véhicule qui se déplace à des distances de 400 à 500 km nécessite un réseau de bornes de charge rapide ou très rapide disponibles et de qualité.

Il ne reste donc plus qu'à faire suivre les infrastructures... L'investissement demeure colossal, mais des fonds d'investissement s'y intéressent de près. Dans l'intervalle, pour gérer le scepticisme de certains et le temps nécessaire au déploiement, deux solutions s'offrent à nous : le véhicule hybride rechargeable et le numérique qui, comme nous l'avons vu, permet de sécuriser et de simplifier le parcours du client.

Integration of electromobility with the electric power systems: The key challenges

By **Yannick PEREZ** and **Wale AROWOLO**

Armand Peugeot Chair, Laboratoire de génie industriel,

Équipe Développement durable, CentraleSupélec

Introduction

As a result of the ongoing energy transition propelled by deep transforming trends, such as liberalization, decarbonization, and digitalization, the traditional electric utilities are undergoing unprecedented transformation of their mode of operation. To decarbonize, the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) identified many possible pathways to reach carbon neutrality by the end of the century. These include acting on decarbonizing the production of electricity, undertaking massive electrification (to increase reliance on clean electricity), switching to cleaner fuels, improving efficiency, and reducing waste in all sectors [14]. For the electric utilities, decarbonization impacts power generation, for instance, a change from fossil fuels, such as coal, oil, and gas plants to renewable energies.

Digitalization is the growing application of Information and Communications Technologies (ICT) in the energy systems [15]. The electricity sector is now impacted by this transformation, where digitalization is blurring the distinction between generation and consumption, and enabling four interrelated opportunities – smart demand response, integration of variable renewables, facilitating the development of distributed energy resources, and electromobility smart charging technologies [15]. At the heart of electromobility is the Electric Vehicle (EV) that interacts with the electric grid and utilities. According to the International Energy Agency (IEA), there are over 10 million electric cars, 290 million 2 and 3 wheelers, 378,000 light commercial vehicles, 600,000 buses, 31,000 trucks, and 230 million micromobility e-scooters, e-bikes, electric mopeds globally in the year 2020 [10 ; 13]. Moreover, forecasting for the coming years is positive for end-users' electromobility acquisition due to battery costs decline, mass production of the battery cells, and the energy density increase.

If energized with decarbonized electricity and smart (digitized) charging, electric vehicle (EV) smart charging can help to shift charging to the periods when electricity demand is low, and supply is abundant. According to the IEA, this would provide further flexibility to the grid while saving between USD 100 billion and USD 280 billion in avoided investment in new electricity infrastructure between 2016 and 2040 [15]. Furthermore, electromobility will provide a partial solution to protecting collective public goods like local public health (*via* reduced urban air pollution). It is also helping to reduce NO_x and CO₂ emissions, thus helping to stabilize the climate, and reducing domestic consumption of transport fuel, thus increasing energy security and independence [5]. Nevertheless, large fractions of EVs could also impact the load profile of utilities by overloading the electric generation capacity (regionally) or the electric distribution systems (locally) [5]. In some cases, EVs will also require extending and reinforcing the existing electricity grids when electrifying urban areas or highways for fast charging.

Therefore, market design rules, regulations, and government policies should proactively address the new challenges of the EVs (*i.e.*, V1G – that can charge power from the grid, and V2G – that can charge and discharge power to the grid) interaction with the electric utilities.

This paper analyzes the opportunities and challenges those electric utilities are facing with the increased uptake of electromobility (V1G and V2G) in section 1. Section 2 is the discussion of the transformation of the electric utilities and electromobility. Section 3 is the discussion of the challenges, and it also presents a descriptive framework for the market design and regulatory challenges.

Electric utilities and electromobility

Electric utilities decarbonization entails reducing or eliminating carbon emissions by phasing out fossil fuels from the generation of electricity. This involves shifting the generation to carbon-neutral electricity sources. For example, by replacing coal and gas plants with intermittent renewable sources of energy, such as wind and solar power. The intermittent sources of energy bring new challenges to the utilities, such as ensuring system reliability and the security of supply to instantly balance supply and demand of power generation. In addition, it brings new market actors and increases the need for coordination and management of the grid. Moreover, complexity increases with increasing renewable energy shares while in parallel phasing out fossil fuels. In terms of demand planning, future energy demand forecasts rely on models that contain uncertainties about forthcoming needs of the installed capacity [17]. The model results vary broadly depending on the institution and the considered scenarios. While improvements in efficiency would decrease the final energy demand, the electrification of other sectors (for example transport *via* electromobility), however, will increase the electricity demand and, therefore, the total energy demand [17].

Decarbonization also brings to the utilities the risk of stranded assets. Changes in the market structure could lead to a situation in which technical units are unable to earn money before the end of their lifetime and, thus, become stranded assets. Besides, stranded assets can also occur with renewable energy when, for instance, support schemes expire [17]. Moreover, since renewable technologies have zero marginal cost, they reduce the average electricity prices. Thus, renewables can amplify market design flaws, leading to negatively priced periods at times. In addition, the concern about making (the right) investments in the energy sector during an uncertain period can result in a reduction of electricity generation capacity and incapability to meet the demand [17].

Digitalization holds the potential to build new architectures of interconnected energy systems, including breaking down traditional boundaries between demand and supply [15]. Digitalized energy systems in the future may be able to identify who needs energy, and deliver it at the right time, in the right place and at the lowest cost. The greatest transformational potential for digitalization is its ability to break down boundaries between energy sectors, increasing flexibility, and enabling integration across entire systems. Aggregated and anonymized individual energy use data can improve the understanding of energy systems, such as the load profiles, and help lower costs for consumers [15]. While digitalization can bring many positive benefits, it can also make energy systems more vulnerable to cyberattacks and create consumer privacy issues.

Linked with the electric utilities' transformation is electromobility. Electromobility is a part of a wide and intertwined ecosystem, that involves both transport (car, battery, charging infrastructure manufacturers etc.) and electric systems (utilities, regulatory authorities, market traders, service providers etc.), as well as urban planners, researchers etc. The increasing number of EVs that will interact with the power grid in the coming years will certainly require special attention from the grid operators and regulators. EVs will both represent an additional load and a distributed flexible resource for the grid services. Only through an optimal management of the charging process will it be possible to solve the potential system challenges and take advantage of the potential opportunities [12]. As EVs become a significant fraction of the fleet (and if they are implemented

along with intelligent V1G and V2G systems) would lead the whole electricity system to undergo an important paradigm change [5]. The need to match generation and load becomes more challenging as the variable generation increases to represent a larger fraction of the generation mix. However, large-scale EV introduction, along with the possibility of charging and discharging these vehicles in an intelligent way, will facilitate the real-time management and greatly reduce the short term need to precisely balance generation with load [5]. Electromobility represents a crucial opportunity for more sustainable transport, and its optimal charging management could generate relevant benefits for the energy sector as well [12].

Electromobility challenges for utilities - The technical issue

The most compelling technical challenge of V1G and V2G systems is the battery degradation as a result of wear from increased use [2]. Battery degradation can cause loss of capacity over time which impacts an EV's range capability. The fear of battery degradation may make EV owners unwilling to participate in rendering V2G services to the utilities and prevent the utilities from accessing the valuable flexibility services the batteries can provide. According to some V2G expert working on some EV battery pilot project in Denmark, the batteries are reported to have degraded between 7-12% (after 4 years of use). It is reported that 1-2% of the degradation is due to V2G while the rest is due to battery aging, driving, and fast charging [11].

The second key technical challenge is the overall efficiency of V2G sending energy to and from the grid, particularly from the electric vehicle supply equipment (EVSE) [2]. The aggregators face two central challenges, the first is with implementing algorithms that can handle the growing complexity of the V2G systems, and the second is with the communication system [2]. In addition to the challenges of aggregation, algorithms, and scaling of a V2G system, a related challenge is the communication standard that is used in the V2G system to transmit messages to and from the EVs/EVSEs and the electric utilities. Across the various existing V2G projects, no single standard has taken hold, with projects around the world using different communication protocols [2]. Other technical issues are the cybersecurity risks, managing data privacy concerns, and metering accuracy and reconciliation among different actors. With respect to metering, a key challenge is to clearly define who is metering what and how to manage/prevent a metering dispute.

Apart from the large fractions of V1G that could impact the load profile of the electric utilities by overloading the electric generation capacity or the electric distribution systems [5], the current market rules in several wholesale markets are insufficient and need to be modified to better accommodate aggregators offering the V2G services [4]. Other challenges include defining and clarifying the regulatory complexities of V2G and energy storage, and the market entry barriers for the storage-based actors. As the V2G capacity grows, it has the potential to participate in several markets at once, providing "stacked" services, but the current market design rules inhibit simultaneous bidding into multiple markets [2]. In a nutshell, there are a variety of regulations within current and emerging ancillary services markets that need to be resolved, both in the short and in the long run, to increase the value of V2G and decrease the barriers to entry [2].

Besides, there are also other market design elements that reduce the economic viability of a V2G system. These elements include double taxation and the curtailment requirements of renewable energy. With respect to double taxation, the aggregators of V2G services are required to pay fees and taxes when they charge and discharge electricity. This can have substantial economic implications for V2G when providing services like frequency regulation, where electricity frequently flows in and out of the battery. The curtailment requirements stipulate the maximum amount of renewable energy supply allowed into the grid to manage the intermittency without jeopardizing the security of supply [2].

Ways to overcome the challenges

Minimizing battery degradation, optimizing charger efficiency, and implementing effective algorithms to aggregate resources pose significant challenges, but the V1G and V2G systems need to do all of the above while also scaling up in the near future [2]. There is also a need to regulate the privacy and security aspects of the data streams. Privacy and security of data collection during V1G and V2G operations may become an increasingly pressing challenge, that requires further regulation [2]. Also, common standards should be developed and adopted to guarantee the interoperability of charging networks [12]. Moreover, EV-charging control systems should be designed in such a manner that data failure or manipulation does not lead to a substantial change in the system balance (cyber-resilience), and emergency situations are properly managed (such as the restoration after blackouts) [12].

To unlock the full flexibility potential of electric vehicles through V1G and V2G services, reap the synergies with variable renewable generation, and reduce electricity generation capacity needs, would require the adaptation of the market and regulatory frameworks. Currently, flexible EV integration is not on track for power systems to accommodate the distributed loads of the EV batteries in a coordinated way, and on a large scale. The aggregators and the business models require updated regulatory frameworks to reward EV owners for providing flexibility services. This will ensure EV batteries can contribute to the power system's stability on a significant scale [16].

We will discuss four potential solutions in an attempt to address the market design and regulatory challenges as follows: analyzing the market rules ; improving the market rules ; reviewing the regulators' evaluation criteria, and changing the market rules.

- Analyzing the existing rules in the V2G frequency regulation markets to (i.) identify the barriers to entry for the aggregators and to (ii.) identify some options to overcome the barriers, and identifying a combination of rules that could facilitate reserve provision by the EVs in the frequency regulation market [8].
- The TSO market rules could be improved by (i.) creating a legal framework and a formal status for distributed storage units in the TSO rules, and by (ii.) easing the rules to encourage the building of coalitions of small, distributed units [9]. Such aggregation would have a single-entry point from the TSO perspective, which would enable them to dispatch the power flows among the distributed units, thus maximizing the aggregators' ability to bid in the electricity market [9]. Increasing the granularity restriction would make it possible to offer more reserve, thus increasing the potential revenues and allowing business cases to be more viable [7].
- The EV industry is a complex system within which firms choose among competing organizational architectures, and regulatory institutions emerge from the interaction between firms' choices and rule-makers' beliefs. The main drivers to change regulatory institutions are the 'evaluation criteria' applied to outcomes. Evaluation criteria are the rule-makers' simplified models against what outcomes are evaluated. The emergence of a dominant organizational design may be crucially affected by those criteria, and the organizational design affects the path of technological evolution. Consequently, the rule-makers' beliefs might determine the technological path chosen by the EV industry [6]. Therefore, it is critical to review the evaluation criteria of the regulators.
- Using EVs as TSO reserve-providing units have been demonstrated as a feasible and a profitable solution. Nevertheless, the TSO market rules have potentially a great impact on the EV's expected revenues [9]. Since the subsisting rules are made for existing actors in the electric power industry, introducing the EVs to the market requires changing some of the subsisting rules to facilitate money (revenue) flow from the grid operator (TSO or ISO) to the aggregators, and from the aggregators to the EV owners [9].



Description of the VtoG challenges (© All rights reserved)

Based on the foregoing arguments, we provide a descriptive framework to address the market and regulatory challenges in Figure 1 below. Figure 1 would help to provide insight and guide decision-making to address the market and regulatory challenges of the V1G and V2G interaction with the electric utilities in a methodical manner.

It should be useful for the regulators and the other stakeholders to understand the market rules and to facilitate informed decision-making on the market design. It is noteworthy that this framework is iterative and not necessarily a step after the other. Its application will depend on the state of the market design at any point in time. For example, a review of the regulator's evaluation criteria may require a need to improve the market rules that may subsequently require a change of some market rules. In this case, it

may be logical to start with the review of the regulator's evaluation criteria.

Conclusion

This paper discusses the energy transition challenges of decarbonization and digitalization facing the electric utilities and the increasing interaction with electromobility. First, it discusses decarbonization that brings new market actors, and increases the need for coordination and management of the grid, but can also cause stranded asset problems. Second, it discusses the impact of digitalization, such as breaking down boundaries between energy sectors, increasing flexibility, and enabling integration across entire systems, which can also raise security and privacy concerns. Third, it discusses the technical, market design, and regulatory challenges of the interaction of electric utilities and electromobility. Finally, it attempts to provide an iterative analytical framework that entails (i.) analysis of the market rules; (ii.) improvement of the market rules; (iii.) a review of the regulators' evaluation criteria, and (iv.) the need for a change of the market rules to address the market design and regulatory challenges.

References

- [1] THOMPSON A. & PEREZ Y. (2020), "Vehicle-to-anything (V2X) energy services, value streams, and regulatory policy implications", *Energy Policy*, 137(2).
- [2] NOEL L., ZARAZUA DE RUBENS G., KESTER J. & SOVACOOOL B. K. (2019), *Vehicle-to-Grid: A Sociotechnical Transition Beyond Electromobility*, Palgrave Macmillan.
- [3] KEMPTON W. & TOMIC J. (2005), "Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue", *J. Power Sources*, 144, pp. 268-279, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.025>.
- [4] EID C., CODANI P., PEREZ Y., RENESES J. & HAKVOORT R. (2016), "Managing electric flexibility from distributed energy resources: A review of incentives for market design", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, pp. 237-247.
- [5] KEMPTON W., PEREZ Y. & PETIT M. (2014), "Public policy strategies for electric vehicles and for vehicle to grid power", *Revue d'Economie Industrielle*, N°148, pp. 263-291.

- [6] VAZQUEZ M., HALLACK M. & PEREZ Y. (2018), “The dynamics of institutional and organizational change in emergent industries: The case of electric vehicles”, *International Journal of Automotive Technology and Management*, 18(3), pp. 187-208.
- [7] BORNE O., PEREZ Y. & PETIT M. (2018), “Market integration or bids granularity to enhance flexibility provision by batteries of electric vehicles”, *Energy Policy*, 119, August.
- [8] BORNE O., KORTE K., PEREZ Y., PETIT M. & PURKUS A. (2018), “Barriers to entry in frequency-regulation services markets: Review of the status quo and options for improvements”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, part 1, January, pp. 605-614.
- [9] CODANI P., PEREZ Y. & PETIT M. (2016), “Financial shortfall for electric vehicles: Economic impacts of transmission system operators market designs”, *Energy*, 113.
- [10] Global EV Outlook (2021), “Accelerating ambitions despite the pandemic”, International Energy Agency (IEA), April.
- [11] ACES Project, Technical University of Denmark : <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6729830457019641857/> Accessed 30:3:2021.
- [12] The European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) (2021), “Electric vehicle integration into power grids”, position paper, March.
- [13] IEA (2021), “EV city casebook scaling up to mass adoption edition”, International Energy Agency (IEA), Paris.
- [14] FAY M., HALLEGATTE S., VOGT-SCHILB A., ROZENBERG J., NARLOCH U. & KERR T. (2015), *Decarbonizing Development: Three Steps to a Zero-Carbon Future*, Climate Change and Development, Washington, DC: World Bank.
- [15] IEA (2017), “Digitalization and Energy”, International Energy Agency (IEA), Paris.
- [16] Global EV Outlook (2020), “Entering the decade of electric drive”, International Energy Agency (IEA), Paris.
- [17] PAPADIS E. & TSATSARONIS G. (2020), “Challenges in the decarbonization of the energy sector”, *Energy*, 205, 118025.

La transition vers l'électrique pour des milliers de bus à la RATP : la puissance du numérique au service d'un projet titanesque

Par **Agathe BASTIT** et **Felix von PECHMANN**
RATP

Introduction

Remplacer à grande échelle son outil principal de production par une technologie naissante, en mode accéléré, avec un investissement colossal – c'est une décision que l'on ne prend pas souvent et que l'on met encore moins souvent en œuvre avec succès. Voici le récit d'une de ces décisions, et de quelques éléments ayant contribué à son succès.

La RATP a décidé en 2014, avec Île-de-France Mobilités, de remplacer l'intégralité de son parc d'autobus⁽¹⁾, en moins de dix ans, par des bus électriques et biogaz, en créant au préalable toute l'infrastructure pour leur alimentation en énergie. Les investissements dépassent largement le milliard d'euros, et le projet a été qualifié de « pharaonique » ou de « titanesque » par certains acteurs en interne à son lancement. Permettant une réduction de 50 % des émissions de gaz à effet de serre de l'entreprise, c'est un projet technologique et écologique majeur, mais c'est aussi un grand défi organisationnel, car il révolutionne le modèle industriel d'exploitation et de maintenance des bus, en particulier pour la partie électrique, sur laquelle nous nous concentrerons dans cet article.

Cette décision d'électrification d'une grande partie de la flotte de bus a été prise alors que la technologie n'en était qu'à ses premiers pas en Europe. Aucun réseau de transport n'avait d'expérience significative de conversion à l'électrique dans un milieu urbain aussi dense que celui de la métropole parisienne. Or, l'électrification d'une flotte de véhicules ne se fait pas en remplaçant des moteurs thermiques par des moteurs électriques. Le développement d'un service de transport public électrique génère un changement de paradigme de l'ensemble des variables constituant le système de transport : les bus, les infrastructures énergétiques associées permettant de les exploiter, la conception et l'activité des dépôts qui les maintiennent, les processus... L'autonomie des bus, presque illimitée avec des moteurs diesel, doit être contrôlée et pilotée ; le ravitaillement des bus la nuit, qui prenait quelques minutes en diesel, dure désormais environ cinq heures.

Si l'intégration de ces contraintes pouvait se résoudre en augmentant le nombre d'autobus, l'objectif du programme était d'opérer la transition énergétique de la flotte d'autobus à nombre de bus constant.

Dans cet article, nous illustrerons en quoi le recours au numérique a été indispensable pour mener à bien une telle transition d'un système quasi-modulaire à un système intégré. D'autres facteurs ont contribué au succès du projet, et une partie a d'ailleurs déjà été documentée (von Pechmann et Midler, 2019). Nous verrons comment une phase d'anticipation a permis d'établir la faisabilité technique en créant des outils de simulation numérique. Nous verrons ensuite que le déploiement, qui s'est fait dans des dépôts en exploitation, s'est appuyé sur l'implication de nombreux acteurs, équipés d'outils d'analyse numérique créés pour l'occasion.

(1) Le parc d'autobus de la RATP comprend 4 700 véhicules répartis dans 25 dépôts situés principalement dans Paris et sa petite couronne.

Anticiper par la simulation

Dans les phases en amont du programme, le recours à la simulation, et au traitement massif de données, a permis de mieux concevoir le système, de rassurer les parties prenantes et d'anticiper les moyens à mettre en œuvre pour un déploiement à grande échelle. Nous évoquerons trois analyses structurantes, menées de manière concourante dans les premières phases du programme : l'analyse du mode de charge, du fonctionnement d'un dépôt de bus, et de l'autonomie compte tenu de l'exploitation quotidienne.

Un choix structurant : la recharge de nuit, au dépôt de bus

Si certains réseaux de transport ont fait le choix de la recharge des véhicules en terminus, les premières études montraient que cette solution ne pouvait pas convenir pour recharger les autobus électriques du réseau de la RATP. D'une part, les contraintes spatiales en milieu urbain rendent l'insertion de systèmes de charge délicate : une importante densité de bâtiments classés, des terminus avec peu d'emprise au sol, la grande quantité de terminus à équiper. D'autre part, l'exploitation quotidienne dans le milieu urbain dense de la région parisienne apparaissait comme peu compatible avec une recharge en terminus : les bus ne stationnent parfois que quelques instants en terminus, et des aléas (manifestations, travaux, déviation...) conduisent régulièrement à des modifications de parcours ne permettant pas aux bus d'arriver jusqu'en terminus.

Les premières analyses ont donc porté sur les temps de présence des autobus au dépôt la nuit, pour s'assurer qu'ils pourraient être rechargés. Elles ont montré que la plupart des véhicules sont disponibles entre quatre et six heures par nuit pour être rechargés, ce qui a permis de pré-valider la piste de recharge de nuit. Assez tôt, le choix s'est donc porté sur la recharge nocturne des véhicules au dépôt, une option qui permettait de préserver une grande partie de la flexibilité d'exploitation du mode bus⁽²⁾. À l'époque, cette option allait à l'encontre des choix technologiques de nombreux fabricants qui préféraient intégrer moins de batteries à leurs véhicules, ce qui demandait des modifications moindres par rapport aux véhicules diesel.

Le réseau électrique tiendra-t-il ? Un simulateur de dépôts de bus

En parallèle, l'ingénierie interne et les distributeurs d'électricité voulaient s'assurer que près de 15 centres bus alimentant de nuit plus de 2 000 bus n'allaient pas plonger dans le noir la population francilienne. Il fallait aussi vérifier que le courant pourrait être acheminé jusqu'aux dépôts. De cette question cruciale dépendait le nombre de câbles devant être tirés depuis les postes de distribution de l'électricité ainsi que le choix de ces derniers. L'enjeu était de taille puisque la pose des câbles engendrerait des fouilles importantes sur la voie publique. On sait aujourd'hui qu'elles avoisinent les 100 kilomètres.

La réponse à la question n'était pas évidente. Une simple multiplication du nombre de bus par la puissance de charge maximale d'un bus aurait conduit à une large surestimation de la puissance de raccordement nécessaire. L'équipe projet décide donc de créer un simulateur afin de répliquer intégralement le fonctionnement d'un dépôt : les heures de rentrée et de sortie de chaque bus, les lignes, les distances parcourues, les lieux de stationnement au sein du centre... De nombreuses simulations ont été réalisées pour chaque dépôt et chaque journée type d'exploitation, dépendant notamment de la saison et de la période de la semaine. Elles ont été affinées selon plusieurs hypothèses d'affectation des bus aux courses de la journée, et de logiques de pilotage de la charge.

(2) Flexibilité par rapport aux modes ferrés, très liés à l'infrastructure, ce qui permet de déployer ou de modifier une ligne de bus beaucoup plus rapidement qu'une ligne de tramway ou de métro.

Ces travaux de modélisation ont permis de rassurer sur le déploiement à grande échelle. S'il s'agit d'un projet d'ampleur pour le réseau électrique en Île-de-France, la recharge de bus électriques est compatible avec le réseau de distribution en place. L'intégration des bus électriques se fait de manière très fluide, grâce à des complémentarités entre les moments d'utilisation du réseau électrique et du réseau de transport. Lorsque les voyageurs dorment, ils consomment peu d'électricité et ne prennent pas les transports. Les bus sont donc en grande partie garés en dépôt et peuvent être rechargés dans des périodes creuses pour le réseau électrique.

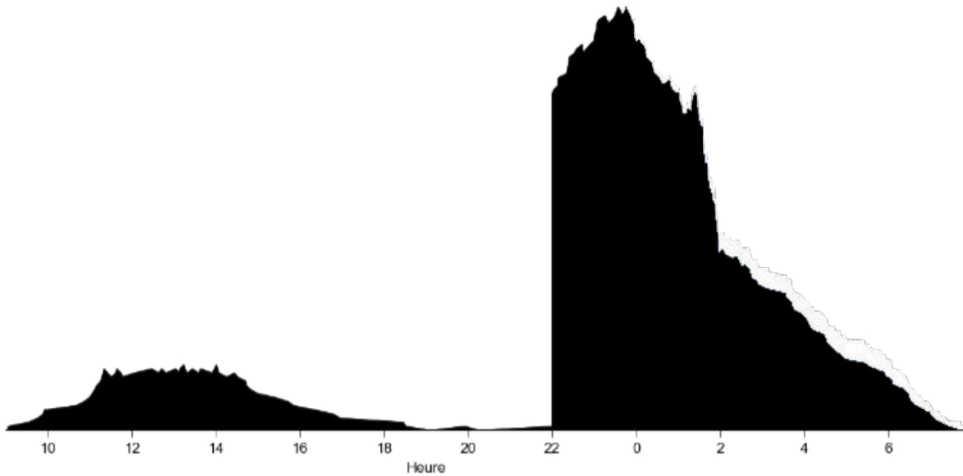


Figure 1. Exemple de courbe de charge pour un centre modélisé, avec un pilotage minimisant la puissance soutirée avant 22 h (Source : études RATP)

Les études ont montré que, pour garantir la charge des véhicules, la puissance de raccordement est de l'ordre de 10 à 15 MW par centre bus, en fonction du nombre de véhicules, la typologie des lignes et de l'offre de transport⁽³⁾. Un pilotage de la charge permet de positionner les pics de puissance la nuit entre 23 h et 4 h du matin, qui correspond à une période creuse pour le réseau électrique. C'est un des avantages de la recharge de nuit par rapport aux recharges ponctuelles en journée aux terminus : ces derniers sollicitent le réseau électrique tout au long de la journée, lorsqu'il est déjà contraint, notamment en région parisienne.

Les bus auront-ils assez d'autonomie ? Un simulateur d'exploitation et des mesures expérimentales

Une troisième question inquiétait à juste titre, et a été investiguée en parallèle des deux précédentes : comment s'assurer que l'ensemble des bus auront suffisamment d'autonomie pour réaliser leur service ? Comment tenir compte des nombreux aléas quotidiens (manifestations, déviations, travaux...) ? Le bus diesel offrait une autonomie quasiment illimitée pour un temps de « charge » de quelques minutes. La diminution de souplesse devait donc être compensée par une meilleure planification.

En principe, les conditions d'exploitation du bus urbain font de lui un excellent candidat pour l'électrification. Contrairement à certains véhicules particuliers, qui servent pour aller faire les courses, mais aussi pour partir en vacances, les bus urbains opèrent quotidiennement dans un environnement connu à l'avance, sur des distances sensiblement similaires et selon un mode planifié. En optimisant la planification, on peut ainsi simultanément s'assurer que les batteries

(3) Et donc des heures de rentrée et de sortie des bus, et des kilomètres parcourus en journée.

seront suffisantes pour les trajets planifiés et maximiser leur utilisation. Encore fallait-il s’assurer de la faisabilité en pratique.

Pour anticiper ces questions, des simulations d’exploitation de la flotte électrique ont été conduites, en combinant des mesures sur véhicules électriques, des données réelles issues de l’exploitation des bus thermiques, et les trajets planifiés théoriquement jour par jour, ligne par ligne ⁽⁴⁾. Ces études ont permis de mesurer finement les modifications à apporter à certains trajets, notamment pour mieux répartir les distances parcourues. Il s’agissait là d’une opération nouvelle pour les experts et les logiciels employés, cette contrainte n’existait pas pour les véhicules thermiques. Un bus diesel pouvait parcourir 140 km un jour, et 240 km un autre. Pour un bus électrique, il est préférable de parcourir 190 km les deux jours. Les apprentissages collectifs de cette période, et les méthodes de simulation numérique déployées, démontrent qu’il était possible d’électrifier la flotte de bus sans augmenter sa taille.

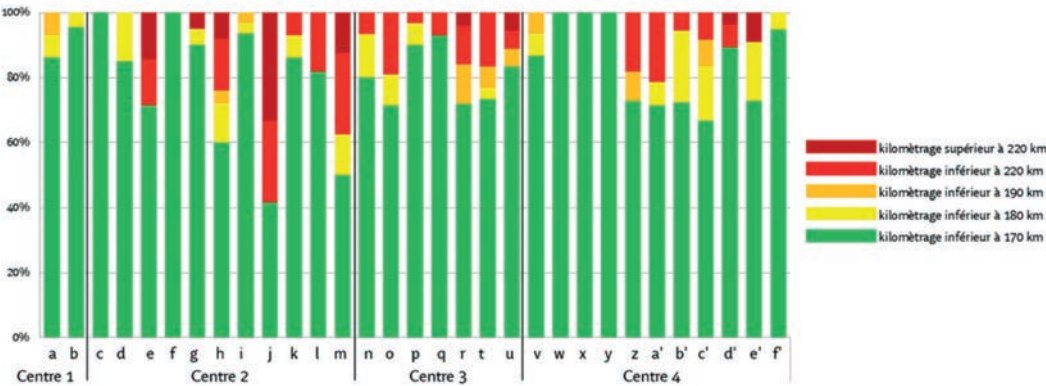


Figure 2. Exemple d’analyse de distances quotidiennes parcourues pour chaque ligne d’un centre bus (Source : études RATP)

Ces analyses ont aussi permis de mieux piloter le déploiement de lignes de bus électriques, en privilégiant dans un premier temps des lignes avec de meilleurs taux de compatibilité.

Les différents simulateurs ont servi au-delà des phases de conception en amont. Avec le déploiement des premiers autobus électriques dès 2016, de nombreuses données ont été enregistrées et analysées afin d’affiner les simulations.

Ces boucles actives d’apprentissage ont permis à la RATP de maîtriser progressivement les aspects liés à l’autonomie, et de faire croître le nombre de bus électriques sur le réseau. Aujourd’hui, elle arrive même à faire circuler des bus électriques sur des services de nuit, les Noctiliens. Dans la continuité des études en amont, des études fines d’affectation des véhicules sur les services ont été réalisées et ont permis le déploiement de bus électriques sur les premiers services de nuit, et cela sans acheter de bus supplémentaires.

Les compétences internes en traitement de données, ainsi que les progrès des outils de mesure et des capacités de calcul, ont permis de mener ces travaux à un rythme soutenu, et illustrent à nouveau comment les progrès du numérique peuvent avoir des effets majeurs sur le déploiement de disruptions systémiques (von Pechmann et Midler, 2019).

(4) Trajets planifiés dans ce qui s’appelle un « tableau de marche ».

Déployer en organisant l'apprentissage

Le déploiement des bus a été organisé de manière progressive, pour permettre l'apprentissage tout en garantissant une exploitation fluide pour les clients. Il a énormément bénéficié des travaux de planification en amont, mais aussi des capacités de traitement et d'analyse de données en accompagnement du déploiement, et bien sûr d'une grande réactivité opérationnelle pour garantir le bon fonctionnement des bus dans la journée. Nous le verrons sur les exemples de l'optimisation du chauffage et le pilotage de la recharge des véhicules.

Piloter le chauffage pour maîtriser l'autonomie

Un changement relativement anodin à première vue concerne le chauffage. Sur un bus thermique, la chaleur pour chauffer le conducteur et les voyageurs provient principalement du moteur thermique, et elle est disponible de manière à peu près illimitée. Dans un bus électrique, le moteur ne génère pas de chaleur réutilisable, du fait d'un rendement bien meilleur. Il faut donc la produire en utilisant l'énergie stockée dans la batterie⁽⁵⁾, et donc l'économiser. Cet enjeu d'économie était nouveau, à la fois pour les constructeurs, les ingénieurs et mainteneurs internes, ou encore les conducteurs.

Les constructeurs et leurs équipementiers n'avaient jamais jusque-là eu besoin de prêter une attention particulière aux performances de chauffage de leurs véhicules, et peu d'attention avait été accordée au sujet. Lors de l'hiver 2018, les premiers bus électriques équipés de chauffages 100 % électriques avaient vu leur autonomie réduite drastiquement, ce qui inquiétait en interne sur la capacité réelle de déployer des autobus électriques.

En effet, comment chauffer au mieux en plein hiver un bus qui est assimilable à un espace de 30 m² dont les portes s'ouvrent toutes les trois à cinq minutes ? Les équipes projet ont montré que c'était possible.

Pour comprendre, des outils de mesure et de vérification ont été déployés par les équipes d'ingénierie. Des analyses ont été menées sur tous les facteurs influençant l'autonomie et le confort thermique à bord des bus, et ont permis deux apprentissages principaux.

Premièrement, les bus électriques appelaient un pilotage très précis du chauffage selon les températures, compétence que toutes les parties prenantes ont dû acquérir. Les logiques de pilotage mises au point permettent maintenant de distinguer le conducteur, assis pendant de longues périodes, des voyageurs, de passage dans le véhicule, venant de l'extérieur.

Deuxièmement, le préconditionnement thermique des véhicules lorsqu'ils rechargent la nuit est indispensable, car il permet non seulement de se servir de l'énergie disponible sur le réseau électrique sans affecter l'autonomie, mais aussi d'améliorer le ressenti du conducteur à sa prise de service. Ce constat pouvait sembler évident, mais le préchauffage des véhicules n'était pas jusqu'alors nécessaire à Paris, et son pilotage a dû être appris par l'ensemble des parties prenantes.

En parallèle, les premiers autobus commençaient à circuler avec des chauffages électriques. La situation étant nouvelle pour les conducteurs et leurs encadrants, des communications régulières ont été réalisées afin de les sensibiliser sur un usage raisonné du chauffage et expliquer ses nouveaux modes de fonctionnement. Les écouter a permis de mieux comprendre leurs besoins, qui avaient certes été anticipés dans les phases en amont, mais la « vraie vie » fait apparaître des besoins plus précis et des situations que personne n'avait anticipées.

(5) Si le bus est équipé d'un chauffage complémentaire, il est possible de produire une partie de la chaleur à partir de carburants embarqués dans le véhicule, ce qui permet notamment de faciliter la gestion des semaines les plus froides de l'hiver.

Ces travaux ont permis de gagner en autonomie l’hiver et de limiter l’influence du chauffage sur l’autonomie. Cet exemple illustre la puissance d’une analyse de données techniques combinée à l’organisation systématique d’un retour d’expérience avec les utilisateurs. Comme c’est souvent le cas dans l’analyse de données, la puissance vient de l’intersection entre traitement de volumes de données importants et recueil méthodique de voix d’experts et d’utilisateurs. Ce fonctionnement nécessite beaucoup d’agilité et un spectre large de compétences, pour porter le changement, tout en écoutant attentivement, et pour identifier les freins réels, tout en changeant de référentiel d’analyse.

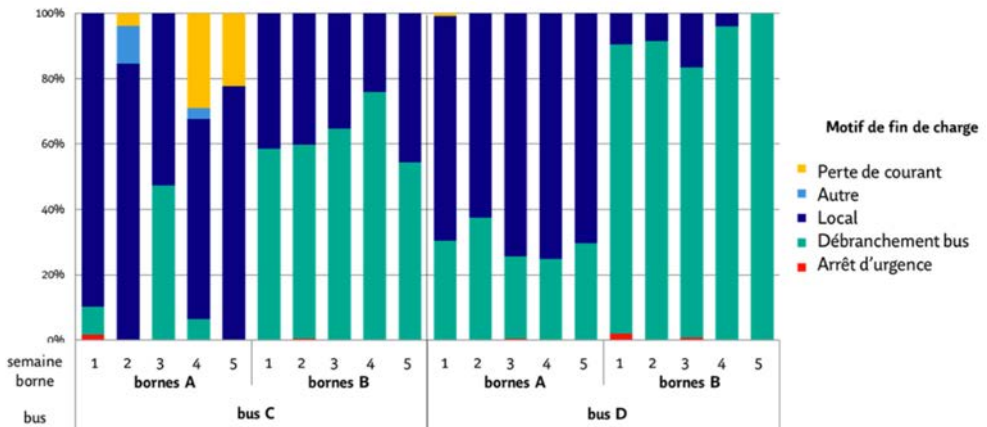
La charge électrique des véhicules à grande échelle en pratique

Une des nouveautés majeures liées à l’arrivée de bus électriques est la charge dans les dépôts. La connexion bus-borne est le maillon essentiel de cette charge, et il était bien moins connu que le maillon « bus-pistolet distributeur de diesel ».

Dans les premières expérimentations, chaque constructeur d’autobus avait noué des partenariats avec des fournisseurs de bornes. Parfois, le format des prises était identique entre différents bus, parfois il changeait. Quand il était identique, la compatibilité était possible, mais n’était pas acquise pour autant. Or, il n’était pas acceptable d’avoir des dépôts avec des places attitrées par type de bus, et de devoir démonter, déménager et remonter des bornes quand on déplaçait un bus d’un centre à l’autre.

L’équipe projet a donc choisi d’imposer l’interopérabilité à la fois aux fournisseurs d’autobus et aux fournisseurs de bornes. Par ailleurs, elle a séparé les approvisionnements en lançant des marchés distincts pour les bornes de recharge et pour les bus. L’objectif était que l’ensemble des bornes et des bus électriques soient compatibles entre eux : que n’importe quel bus puisse se charger sur n’importe quelle borne.

Vu les premières expérimentations, les équipes d’ingénierie savaient que l’interopérabilité était le fruit d’un travail patient et méthodique de synchronisation d’acteurs et de nombreux tests. En théorie, l’interopérabilité est définie par la norme ISO-15118. En pratique, les normes laissent toujours des marges d’interprétation, que deux industriels peuvent comprendre différemment, et il arrive aussi que les fabricants ne respectent pas la norme, de manière volontaire ou non. Dans le cas de la charge, il s’agissait pour les industriels des deux côtés de maîtriser les couches de communication entre le bus et la borne. Pour pouvoir faire converger les fabricants de bus et ceux des bornes, les équipes d’ingénierie de la RATP sont elles aussi rapidement devenues expertes



de ces nouveaux protocoles de communication, afin d'assurer ce rôle d'intégration des différents systèmes.

Pour pouvoir piloter cet apprentissage dans des conditions d'exploitation réelles, des systèmes de supervision ont été mis en place, car il s'agissait à la fois d'améliorer le fonctionnement et de garantir la sortie des bus chargés tous les matins. Des analyses en temps réel et *a posteriori* des données de transactions de charge électrique bus-borne ont ainsi permis de fiabiliser le cœur du système, en comprenant finement les causes de dysfonctionnement majeures pour chaque couple bus-borne comme les défaillances de la batterie, les défaillances de la borne, les défaillances de la communication logicielle bus-borne, l'effet de la mise à jour logiciel sur la fiabilité et la disponibilité de la recharge.

Conclusion

La conversion d'une flotte de bus à l'électrique est une transformation majeure du système de transport, qui nécessite de penser l'évolution de toutes ses composantes. Le programme bus2025 a mis en place une telle transformation à un rythme accéléré. En anticipant les évolutions par des simulations numériques avancées, l'intégration des bus dans l'exploitation et dans le réseau électrique a pu se faire de façon massive, tout en maintenant l'exploitation des centres. Ce déploiement rapide a été rendu possible grâce à un apprentissage organisé, croisant l'analyse de données et les retours de terrain, qui a permis de détecter les potentiels blocages dès les premiers signaux faibles, et de fiabiliser ainsi le système dans les phases en amont du passage à l'échelle massif.

Le programme bus2025 est en train de démontrer que la conversion à l'électrique d'une flotte de plusieurs milliers de véhicules est possible, même sur une technologie en émergence. Une approche systémique, alliant analyse numérique et apprentissage organisé, a été la clé de voûte du succès du programme jusqu'à présent. Le déploiement des bus électriques se poursuit, et nécessitera encore de nombreux efforts collectifs avant d'aboutir d'ici à 2025.

C'est un effort qui le mérite. Au-delà des aspects énergétiques, le bus urbain électrique génère de nombreuses externalités positives au niveau local. Il contribue à rendre nos villes plus silencieuses et plus respirables. Les progrès des traitements numériques ont contribué à rendre ce beau projet possible, et nous espérons qu'il inspirera d'autres grandes améliorations de notre qualité de vie.

Bibliographie

VON PECHMANN F. & MIDLER C. (2019), « Disruption systémique et management de programme ambidextre : le cas des bus électriques », *Gérer & Comprendre*, n°138, décembre, pp. 3-19.

Suivre ses kilowattheures sur le compteur communicant d'électricité ?

Une enquête sur les pratiques ordinaires de comptage domestique

Par Aude DANIELI

Chercheuse associée au LATTS, Université Gustave Eiffel, postdoctorante à Orange Labs

Dans cet article, nous proposons un renversement de perspective sur le comptage domestique, longtemps envisagé comme outil de calcul et de facturation pour les entreprises (Barraqué, 2013), ou contenu dans une banalité du quotidien (de Certeau, 1990, p. 95 ; Desjeux *et al.*, 1996 ; Subrémon, 2009). Plutôt que de restreindre la focale sur les pratiques souvent discontinues de suivi de la consommation d'électricité, largement étudiées (Gaskel et Ellis, 1978 ; Darby, 2009 ; Wallenborn *et al.*, 2011 ; Lafaye *et al.*, 2013 ; Licoppe *et al.*, 2013 ; Draetta *et al.*, 2015), mais qui restent cependant mineures chez les consommateurs ordinaires, l'enquête élargit le spectre à l'ensemble des pratiques, et démontre un répertoire limité d'usages et d'absence de pratiques qui prend sens dans les politiques de désintéressement des interfaces liées aux enjeux de fiabilité, de sécurité et de lutte contre la fraude à l'électricité, perceptibles dans la conception technologique et dans le cadre de la relation de service (Danieli, 2018a). Issu d'une thèse en sociologie sur les mises en débats des processus d'innovations des compteurs Linky, l'article rend compte d'une enquête originale basée sur des entretiens de particuliers (dix entretiens semi directifs réalisés à domicile et une trentaine d'entretiens informels), et sur des observations ethnographiques de la relation de service et de réunions publiques. Cette enquête n'a pas été conçue pour être représentative des usages relevant des économies d'énergie, mais pour permettre d'étudier une diversité de situations, de pratiques d'automesures, de détournements d'usages mais aussi de réactions dans le cadre de la relation de service auprès de personnes qui disposent de compteurs communicants ou traditionnels (électromécaniques ou électroniques), et qui sont parfois équipées de compteurs individuels d'eau et de gaz.

L'horizon d'une simplification de la relation de service et d'une éducation aux économies d'énergie

La perspective d'une simplification des tâches est souvent au cœur des discours accompagnant les nouveaux services numériques. Les compteurs communicants, véritables « interfaces énergétiques » (Cihuelo, Jobert & Grandclément, 2015) entre une multitude d'opérateurs (acteurs de la conception, représentants de la relation de service, pouvoirs publics et agences gouvernementales, associations) et les usagers finaux que sont les foyers, n'échappent pas à cette idéologie. La genèse de ce projet du compteur du futur, d'abord avec le compteur électronique de la fin des années 1980, partiellement diffusé dans les foyers, puis avec le projet d'un compteur intelligent (*smart meter*) au cours des années 2000 nommé « Linky », s'est organisée dans une logique économique en prise avec les enjeux du distributeur EDF-GDF Services (structure qui gérait la distribution pour les deux énergies, gaz et électricité, dans un modèle intégré d'entreprise). Il a été doté de nouvelles fonctions numériques comme la possibilité de télé-interventions techniques et commerciales

(activation, coupure, changement de puissance, collecte des données de consommation, etc.), qui sont principalement supervisées à distance du foyer par un management centralisé et des serveurs informatiques. Une double prescription a pu être observée sur la place du client négociée sur les marchés de l'énergie : (1) une injonction morale de justice économique (faire payer l'énergie de manière plus précise et équitable au client par des mesures d'index plus fiables, limiter les réappropriations locales et jugées malveillantes des matériels avec les dispositifs antifraude du système Linky) et (2) une injonction de mieux gérer le face-à-face avec le client par une relation de service pacifiée et rapide (traiter les demandes des clients plus rapidement, éviter de déranger le client à domicile par le système des télé-interventions).

Dans le contexte de libéralisation des marchés européens des années 2000-2010 et sous l'égide des pouvoirs publics et des réglementations européennes, ce projet embryonnaire au cœur d'EDF, entreprise au monopole marchand, s'est peu à peu transformé en un projet de conception d'un outil numérique au service de la transition énergétique, intégrant une finalité utilisateur (afficheur déporté, gestionnaire d'énergie, box énergétique, applications numériques, etc.). La conception de cet outil de mesure, particulièrement discutée dans le cadre de controverses nationales, s'est accompagnée de tentatives de redéfinition des comportements individuels (Figure 1, page 76), pointant à la fois l'avènement d'un « consommateur honnête et solvable », qui paie ses factures sans retard et sans erreurs de comptage, mais aussi un « consommateur intelligent », qui consulte ses histogrammes de consommation pour modérer ou reporter l'utilisation des appareils aux heures les moins coûteuses du réseau, ou encore pour installer des appareils moins gourmands ou des sources d'énergies renouvelables.

Ces bouleversements qui interrogent les capacités de comptabilité domestique invitent à positionner l'analyse à la croisée d'une sociologie des sciences et des techniques et d'une sociologie attentive à l'innovation et aux usages du numérique et des technologies en société (Akrich *et al.*, 2006 ; Garabuaui-Moussaoui, Pierre (dir.), 2016 ; Martin, Dagiral (dir.), 2016). C'est ce qui permet *in fine* de comprendre comment l'interprétation de ce dispositif (plus ou moins communicant dans la sphère privée) s'enracine dans des convictions personnelles préexistantes.

La comparaison des données de terrain a permis de faire émerger quatre figures idéales-typiques qui oscillent entre des modèles d'appropriation, mais aussi de distanciation au compteur, quel qu'en soit le modèle.

Une infrastructure de réseau technique souvent ignorée...

Avant d'analyser les grandes lignes qui marquent les usages des compteurs et de leurs données, dressons quelques constats du côté du non-usage. L'absence de suivi de la consommation s'inscrit d'abord dans un manque d'intérêt pour le sujet au quotidien dès lors que les personnes ne s'inscrivent pas dans un projet d'optimisation des factures ou une démarche environnementale : elles ne se sentent pas concernées et se revendiquent comme non-utilisateurs (Wyatt, 2003).

Un autre registre très courant de justification du non-usage est de voir l'usage comme une tâche rébarbative, voire déviante : les rares « geeks de compteurs » qui consultent tous les jours sont assimilés à « des tarés ! ». Bien que les outils de suivi des comptes bancaires fassent désormais partie des applications les plus fréquemment consultées sur les *smartphones* avec une surveillance en temps réel (Pharabod et Foucault, 2020), il n'en est pas de même pour la consommation de l'électricité. La sociologie des usages de l'énergie a insisté sur le caractère involontaire des pratiques de l'énergie : il ne s'agit pas d'une activité en soi, mais d'un moyen d'accéder à des activités, par exemple préparer le repas ou se chauffer (Gronow et Warde, 2001 ; Moussaoui, 2009), qui invitent peu à des pratiques d'automesure contrairement aux activités sportives, de loisir et de santé (Régnier, 2018 ; Dagiral *et al.*, 2019). La localisation de cette infrastructure de « mise à distance

Linky : le compteur électrique nouvelle génération va bientôt débarquer chez vous !

EDF

+ SUIVRE

PUBLIÉ LE 30/11/2015 À 16H28 | MIS À JOUR LE 30/11/2015 À 16H45



© REA Tous droits réservés

SAUVEGARDER CET ARTICLE

Votre vieux compteur électrique mécanique vit ses dernières heures de gloire. A partir du 1er décembre, toutes ces antiquités vont être progressivement remplacées par des compteurs de nouvelle génération, baptisés Linky, qui communiqueront à distance votre consommation d'électricité. A quoi sert cet appareil, quand serez-vous équipé et aurez-vous quelque chose à payer ? 5 questions-réponse pour tout comprendre.

> A quoi va-t-il servir ?

Ce compteur communique directement les informations de consommation au fournisseur d'électricité. Cela permet notamment un relèvement automatique des compteurs, sans que personne ne soit obligé de se déplacer. Cela offre aussi la possibilité aux consommateurs de suivre précisément leur consommation, via un site internet dédié. Certaines opérations, comme le changement de puissance, seront aussi facilitées. Pour EDF, cela devrait, par ailleurs, limiter les recours concernant les facturations, ainsi que la fraude.

Figure 1. Le compteur Linky et ses services d'information numériques (Source : capture d'écran de Capital.fr)

des clients » (Danieli, 2018b) n'a rien de neutre et contribue à faciliter l'oubli de l'équipement, dans 50 % des cas hors du domicile, et parfois inaccessible – sous clé détenue par le concierge, dans la cave, en haut d'un poteau électrique (Figure 2, page 78), ou encore parmi une multitude de boîtiers (Figure 3, page 78) –, et le compteur est souvent confondu avec le tableau électrique, le disjoncteur ou le coupe-circuit.

Lorsque le compteur est placé dans un endroit de passage (Figure 4, page 78), celui-ci est à peine consulté et fait l'objet d'une « dé-domestication ». Le diagnostic de l'emplacement dans les espaces de vie, généralement peu dissonant avec l'absence d'usages, a permis de constater que « c'est moche, non ? », ou encore que « cet appareil franchement, il devrait être dehors » comme le dit Anastasia, 33 ans. Le compteur est camouflé par une armoire, parfois bricolée (Figure 6, page 79), servant de porte-photo (Figure 5, page 78). La couleur « vert flashy » des compteurs Linky a pu être jugée criarde : c'est en faisant « tomber » le capot coloré découvrant un boîtier gris clair que les techniciens ont pu satisfaire certains particuliers. La crainte de « prendre le jus » renforce la non-appropriation du compteur, placé sous scellés de protection au même titre que d'autres installations (réseaux de gaz, chauffe-eau, tableau électrique, etc.) qui sont signalées comme étant risquées en cas d'électrocution (Figure 7, page 79). Hélène, 45 ans, n'a pas osé « s'amuser » avec le Linky, et a patienté sans courant jusqu'au retour de son mari. Pour la plupart des clients rencontrés, l'usage se limite à la fonction de disjoncteur désormais intégrée dans le compteur Linky (par activation de plusieurs secondes du bouton « + » pour réenclencher le courant), ce qui a suscité énervements et tâtonnements de la part de quelques clients, jusqu'à parvenir à sa maîtrise. Enfin, certains consommateurs, surtout chez les plus de 60 ans, arguent que les dispositifs ne sont pas agréables à utiliser : les données produites sont en petits caractères, notamment sur l'écran LCD du compteur Linky : « Comment je vais faire ? Avant je voyais les chiffres » (Michel, 68 ans).

Au-delà du désintérêt, certains clients comme les anti-Linky témoignent d'un véritable rejet à l'idée d'être équipés (Figure 10, page 79), qui s'inscrit dans une posture plus politique de dénonciation déjà observée à l'encontre des compteurs énergétiques des années 1990-2010, tant dans les pays du Sud (Jaglin, 2005 ; Criqui, 2014 ; Pilo, 2015) que les pays du Nord (Klopfert et Wallenborn, 2011 ; Hess et Coley, 2012 ; Draetta et Tavner, 2019 ; Lamb, 2020), mais qui, ici, est couplé à une mutualisation de registres de dénonciation (les ondes électriques et leurs effets sur la santé, la « fausse promesse » de la transition énergétique, les dérives marchandes et les risques de surveillance) dans le contexte de « mobilisations à domicile » et d'une « solidarité de voisinage » (Danieli, à paraître). Même si certains restent favorables à l'envoi d'une facturation simplifiée, et pour bénéficier de conseils personnalisés gratuits de maîtrise de l'énergie, il faut noter que les ménages appartenant aux catégories modestes contestent le caractère intrusif de l'appareil, valorisant dans leur projet énergétique le confort et la liberté individuelle (Caron, 2018).

... consacrée comme un outil dédié à la relation de service et à la facturation

Souvent, les occasions où les consommateurs consultent le compteur s'inscrivent dans le contexte de relation de service et à des fins de facturation : c'est pour le « releveur qui passe », ou en cas de contestations de factures avec des réclamations parfois pointues comme sur les compteurs multitarifs ⁽¹⁾. Les rendez-vous techniques constituent rarement une opportunité de connaître davantage leur fonctionnement. Malgré les (rares) explications des professionnels, les individus s'absentent souvent du lieu d'intervention. Si 56 % de Français équipés de compteurs Linky le considèrent inutile, en revanche, 66 % affirment que pouvoir relever à distance la consommation d'électricité aide à simplifier les démarches ⁽²⁾. Ainsi pour Gérald, 58 ans : « Pas besoin d'être sur place puisque ça peut être relevé comme ça ».

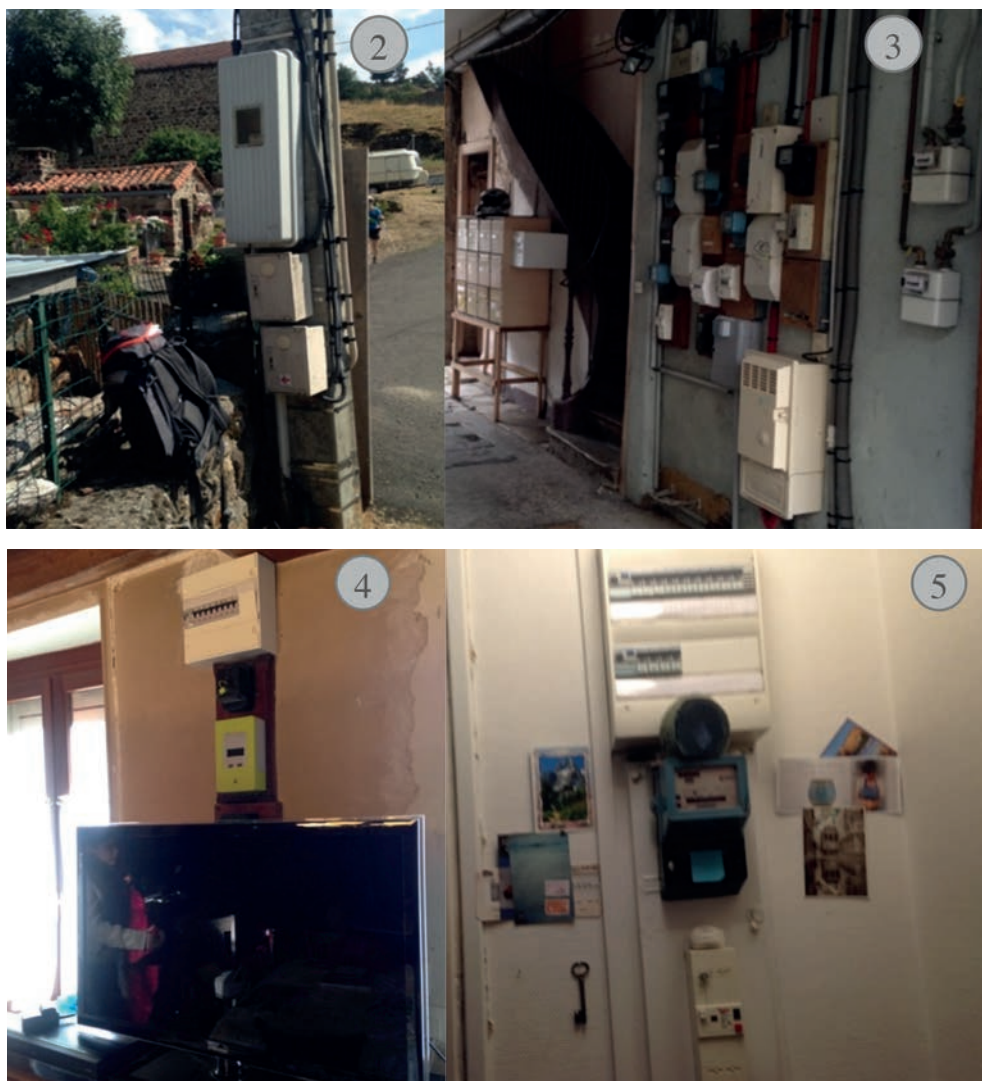
Au début des expérimentations (2010-2014), nombre de consommateurs sont peu informés, alors que l'ouverture au marché aux particuliers (2006) et la création du distributeur d'électricité et de

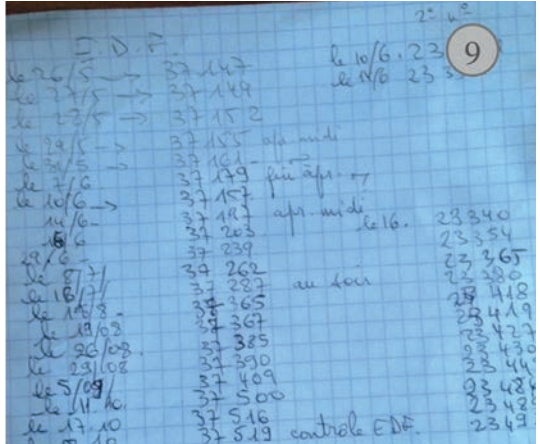
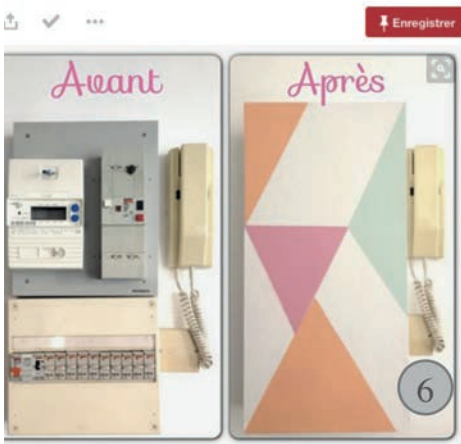
(1) Plus de la moitié des litiges porte sur la contestation des consommations facturées : « Rapport d'activité », Médiateur national de l'énergie, 2016.

(2) Sondage UFC-Que Choisir, 2019.

gaz ENEDIS (2008) sont récentes : ils confondent les fournisseurs d'énergie (EDF, Direct Énergie, etc.) avec le distributeur, bien que cette situation d'opacité ait été réduite au fur et à mesure du déploiement du compteur Linky, constituant progressivement un révélateur des nouveaux marchés de l'électricité. Dans les zones rurales, plus souvent équipées de compteurs électromécaniques du type triphasé et de disjoncteurs à la métrologie défaillante, il peut arriver par exemple que la relève soit ancienne, et que cela entraîne des régularisations de facture basées sur des consommations réelles, qui vont entraîner des incompréhensions et des réclamations avec la pose d'un compteur Linky. Inquiète, Sandrine, 47 ans, a surveillé son compteur communicant quelques mois, puis rassurée parce que n'ayant pas eu de hausse de facture, l'a délaissé dans le garage au même titre que son ancien compteur. Dans les zones urbaines plus denses et où les logements sont équipés de compteurs plus récents du type électronique, plus fiables et dotés d'un système de télérelevé extérieur (Figure 8, ci-contre), les clients n'ont pas toujours remarqué l'implantation du compteur Linky, installé sur le palier d'immeuble ou dans la cave.

Les techniques d'évitement de la clientèle, permises avec les promesses de télé-interventions du système Linky, sont diversement appréciées. Les habitants, étant déjà des « clients fatigués » dans





le cadre de la libéralisation des marchés des années 1990-2000 (Jeannot, 2010), notamment lorsqu'ils habitent dans les zones urbaines, associent cette nouvelle relation de service à un sentiment d'autonomie et à un soulagement en tant que consommateurs, procurés par les télé-opérations permises par les compteurs communicants. Nathalie, 64 ans : « Mais quelle est ma puissance [d'électricité] actuellement ? Si je l'avais su, j'aurais pas eu besoin de passer par 50 000 interlocuteurs ! ». En revanche, la relation de service à distance se fait au détriment de clients qui, eux, valorisent le sens du contact à domicile. Par exemple, certains habitants des zones rurales, peu peuplées, regrettent les passages moins fréquents des professionnels comme les releveurs, assimilés à des garants du service public de proximité.

Figures 2 à 10 (Source : DR - photographies personnelles prises entre 2013 et 2016)

Une interface ponctuelle de gestion de la consommation d'électricité

Du côté des « clients gestionnaires », la catégorie moins importante du corpus d'enquête, la mesure de l'électricité s'inscrit dans une logique d'évaluation des pics de consommation et d'optimisation. Plus de la moitié (56 %) des foyers français estiment que les factures de gaz et d'électricité pèsent lourdement sur leur budget ⁽³⁾, et l'interface du compteur devient un instrument comptable en fonction de la situation socioéconomique. Les CSP + et les profils les moins « écolos » du corpus revendiquent ne pas s'intéresser à la consommation de l'électricité, déclarant la plupart du temps avec fierté : « Les factures, je m'en fous. On paie, et puis c'est tout ». Par contre, les pratiques de gestion de la consommation trouvent un terrain favorable parmi les clients issus des classes populaires, les personnes aux revenus peu élevés et les « gros consommateurs », souvent en maison individuelle. Justine, 40 ans, institutrice, a surveillé son compteur pendant quelques mois pour ne pas faire « exploser » ses dépenses. Il s'agit aussi d'en faire un outil de gestion des dépenses : Matthias, 41 ans, employé, ne laisse pas entrer le releveur, et transmet l'autorelevé qui l'arrange selon ses rentrées d'argent.

Les personnes les plus sensibilisées aux questions numériques et au développement durable, souvent diplômées de l'enseignement supérieur, sont parmi les plus critiques sur la pertinence des mesures mises à disposition avec les services Linky : indifférenciées par poste de consommation, et donc agglomérées comme les générations précédentes de compteurs, ni en euros ni en temps réel. L'absence d'un tel formatage de données entrave leurs projets de transition énergétique. Certains installent à leurs frais des sous-compteurs permettant de connaître les postes de consommation par appareil ménager. Plus rarement, des amateurs d'électronique « bricolent » une liaison entre le système de télé-information client du compteur électronique et un convertisseur monétaire.

Mais, pour beaucoup, la perspective de changer de fournisseur, de comparer les offres, d'éplucher les conditions générales de vente, comme l'invitent les promesses des marchés des réseaux intelligents, n'est pas une partie de plaisir. L'analyse montre que, loin de viser un enregistrement exhaustif de la consommation en temps réel et de procéder systématiquement à des exports de données issus des compteurs manuellement (Figure 9, page 79) sur des fichiers Excel ou *via* les nouveaux services Linky, les clients privilégient une surveillance temporaire de la consommation, souvent jusqu'à ce que la situation financière du ménage s'améliore. Lorsque la mesure est devenue routinière, ils procèdent à un autocontrôle de l'usage des appareils ménagers en arrêtant de consulter le compteur. Dans cet intervalle, il arrive qu'ils délaissent leur compteur aux unités obscures (kWh, puissance maximale consommée, etc.) au profit des factures en euros, dont la plupart connaissent le montant approximatif mensuel de leur consommation. En septembre 2018, seuls 3 % des quelque 13 millions de consommateurs équipés de Linky ont accepté de recevoir les données et les services de consommation approfondis (données fines toutes les demi-heures) ⁽⁴⁾.

La fraude, entre économie de la gratuité et de l'entraide

Certains particuliers s'approprient les compteurs d'une manière relativement détournée, bien que celle-ci soit illégale et faisant l'objet de sanctions : les « pertes non techniques » (fraude, erreurs humaines et imprécisions de facturation, etc.) sont calculées à 2,5 % ⁽⁵⁾, et le vol d'électricité est estimé concerner entre 5 à 8 % des ménages. L'étude montre une surreprésentation d'individus aux revenus modestes et, de manière plus marginale, issus des classes supérieures. Les personnes sont avant tout motivées par les économies d'argent, tel Richard, 53 ans, fonctionnaire : « J'étais

(3) Baromètre Énergie-Info, Médiateur national de l'énergie, 2016.

(4) « Les compteurs communicants pour l'électricité », Les avis de l'ADEME, 2018.

(5) La compensation des pertes à ERDF, 2009.

chargé de recherche au CNRS, je roulais pas sur l'or à l'époque ». Elles déploient nombre d'habiletés techniques de raccordements, de branchements sauvages au réseau et de resquilles au compteur (Bouillon, 2007, p. 421) : introduction d'une aiguille dans la roue crantée, desserrage de la vis d'excitation, usage d'un aimant ralentissant la roue, dépôt d'œufs d'araignées, et, plus rare dans le corpus, déviation de raccordements d'envergure.

« Je pourrais payer, mais voilà, je fraude », « ils le font, parce qu'ils n'ont pas le choix », ces récits montrent que la fraude emprunte à une rationalité de solidarité, et comme relevant d'un problème de société : aggravation de la pauvreté, mal-logement, distribution inéquitable des richesses. Les individus agissent au nom d'une économie de la gratuité (Gaillard, 2013, p. 457), qui s'opère directement sur chaque compteur et non par des procédures officielles qui leur permettraient éventuellement de bénéficier de rabais accordés par leurs conditions modestes, par exemple le Tarif de première nécessité (TPN) ou les aides municipales du Fonds social de l'électricité, comme pour Élisabeth, 44 ans, et son « compteur de chantier » : « En fait, on paie pas l'électricité [elle rit] [depuis seize ans] ». Les fraudeurs mobilisent une rationalité de sobriété : frauder, oui, mais ne pas gaspiller. Enfin, une situation d'ascension sociale, le départ de celui qui bidouille dans le ménage ou encore l'installation d'un compteur électronique ou communicant, moins « fraudable » dans sa conception (Danieli, 2018, p. 129), dissuade souvent le détournement d'usage.

Conclusion

L'examen de la réception du compteur d'électricité permet de vérifier que l'innovation n'est pas une création *ex nihilo* : le processus d'innovation sur un parcours long et les formes de son appropriation, mais aussi de son désintéressement dans les sphères privées, ne peuvent se comprendre que par rapport aux dispositifs préexistants. Banalisé, oublié, redouté ou trafiqué, le compteur renvoie à une diversité de pratiques sociales et de projets développés en matière de contrôle de la consommation de l'énergie, de confort, de budget – bien que cantonnés à des pratiques relativement marginales –, et pour certains pouvant être le reflet de valeurs de service public et de signes de citoyenneté.

Bibliographie

- AKRICH M, CALLON M., LATOUR B. (2006), *Sociologie de la traduction, textes fondateurs*, Presses de l'École des Mines de Paris.
- BARRAQUÉ B. (2013), « Le compteur d'eau : enjeux passés et actuels », *Sciences Eaux & Territoires*, 10(1), pp. 98-105.
- BOUILLON F. (2007), *Les mondes des squats : Productions d'un habitat illégal et compétences des citoyens disqualifiés : le terrain marseillais*, Paris, EHESS.
- CARON C. (2018), "Smart meters by domestic households receiving: The weight of the privacy controversy", XIX ISA World Congress of sociology, Toronto, Canada, 19/07/2018.
- CERTEAU M. de (1990), *L'invention du quotidien*, Paris, Folio, 349 p.
- CIHUELO J., JOBERT A. & GRANDCLÉMENT C. (2015), *Énergie et transformations sociales*, Paris, Lavoisier.
- CRIQUI L. (2014), *Attention ! Travaux en cours : L'extension des réseaux de services essentiels dans les quartiers irréguliers de Delhi et Lima*, thèse de doctorat en urbanisme et en aménagement de l'espace, Université Paris-Est, 522 p.

- DAGIRAL É., DESSAJAN S., LEGON T., MARTIN O., PHARABOD A.-S. & PROULX S. (2019), « Faire place aux chiffres dans l'attention à soi », *Réseaux*, 216(4), pp. 119-156.
- DANIELI A. (2018a), "The French electricity smart meter: Reconfiguring consumers and providers", in SHOVE E. & TRENTMANN F. (éd.), *Infrastructures in Practice. The Dynamics of Demand in Networked Societies*, Routledge, London, pp. 155-168.
- DANIELI A. (2018b), « Des contrats à forfait au compteur électronique (1880-2004) », in DANIELI A., *La « mise en société » du compteur communicant. Innovations, controverses et usages dans les mondes sociaux du compteur d'électricité Linky en France*, thèse de doctorat en sociologie, Université Paris-Est, pp. 69-148.
- DANIELI A. (à paraître), « "Stop Linky, non merci". Mobilisations à domicile et solidarité de voisinage pour le maintien d'une société sans compteurs communicants », *Réseaux* n° 228, numéro thématique « Analyser les données à la frontière de plusieurs mondes sociaux ».
- DARBY S. (2009), "Demand response: The effectiveness of feedback on energy consumption", Stockholm.
- DESJEUX D., BERTHIER C., JARRAFOUX S. et al. (1996), *Anthropologie de l'électricité. Les objets électriques dans la vie quotidienne en France*, Paris, L'Harmattan.
- DRAETTA L., LICOPPE C. & DELANOË A. (2015), « Grid-Teams pour maîtriser la demande énergétique résidentielle. Une approche socio-technique centrée sur l'utilisateur », in BESLAY C. & ZÉLEM M.-C. (éd.), *Sociologie de l'énergie : gouvernance et pratiques sociales*, CNRS éditions.
- DRAETTA L. & TAVNER B. (2019), « De la "fronde anti-Linky" à la justification écologique du smart metering : retour sur la genèse d'un projet controversé », *Lien social et Politiques*, 82, pp. 52-77.
- GAILLARD E. (2013), *Habiter autrement : des squats féministes en France et en Allemagne. Une remise en question de l'ordre social*, thèse de doctorat en sociologie, Tours, Université François-Rabelais, 628 p.
- GASKEL G. & ELLIS P. (1978), *A Review of Social Research on the Individual Energy Consumer*, unpublished manuscript, London, Dpt. of Social Psychology, London School of Economics.
- GRONOW J., WARDE A. (dir.) (2001), *Ordinary Consumption*, Routledge, London and New York.
- HESS D. J. & COLEY J. (2012), "Wireless smart meters and public acceptance. The environment, limited choices, and precautionary politics", *Public Understanding of Science*, 23(6), pp. 688-702.
- JAGLIN S. (2005), « La participation au service du néolibéralisme ? Les usagers dans les services d'eau en Afrique subsaharienne », pp. 271-291.
- JEANNOT G. (2010), « La fatigue d'être client », *Informations sociales*, 158(2), pp. 34-41.
- KLOPFERT F. & WALLENBORN G. (2011), « Les "compteurs intelligents" sont-ils conçus pour économiser de l'énergie ? », *Terminal*, 106-107, pp. 87-99.
- LAFAYE E., VANDENBROUCKE S., MARESCA B. & BRICE L. (2013), « Les compteurs intelligents : vecteurs de changements comportementaux ? Instruments de la maîtrise de la demande d'énergie », *Cahier de recherche*, n°304, Paris, Credoc.
- LAMB T. (2020), *Linky : un compteur pour les gouverner tous. Introduction controversée d'un instrument de « la » transition énergétique*, thèse de doctorat en science politique, Université Paris II.

LICOPPE C., DRAETTA L. & DELANOË A. (2013), « Des “smart grids” au “quantified self”. Technologies réflexives et gouvernement par les traces, une étude de cas sur la consommation électrique en milieu domestique », *Intellectica*, pp. 267-290.

Martin, Dagiral (dir.) (2016), *L'ordinaire d'internet. Le web dans nos pratiques sociales et relations sociales*, Armand Collin, Paris.

MOUSSAOUI I. (2009), « Vers une génération de la modération ? Pratiques, représentations et systèmes de consommation énergétique selon les âges sociaux », in DOBRE M. & JUAN S. (éd.), *Consommer autrement. La réforme écologique des modes de vie*, Paris, L'Harmattan, pp. 253-265.

GARABUAU-MOUSSAOUI I., PIERRE M. (dir.) (2016), *Pratiques sociales et usages de l'énergie*, Lavoisier, Paris.

PHARABOD A. S. & FOUCAULT B. (2020), « Comptabilité domestique : le self-tracking au service d'une amélioration des compétences financières ? », *Lettres Valeurs et usages*, Orange Labs, pp. 17-20.

PILO F. (2015), « Le compteur d'électricité aux favelas : l'espace public entre normes et défiance », *Urbanités*.

RÉGNIER F. (2018), « Goût de liberté et self-quantification », *Réseaux*, 208-209(2), pp. 95-120.

SUBRÉMON H. (2009), *Habiter avec l'énergie. Pour une anthropologie sensible de la consommation d'énergie*, thèse de doctorat, Université de Nanterre.

WALLENBORN G., ORSINI M. & VANHAVERBEKE J. (2011), “Household appropriation of electricity monitors: Appropriation of electricity consumption”, *International Journal of Consumer Studies*, 35(2), pp. 146-152.

WYATT S. (2003), “Non-users also matter: The construction of users and non-users of the Internet”, in OUDSHOORN N. & PINCH T. (éd.) *How Users Matter: The Co-Construction of Users and Technologies*, Cambridge, Mass. : MIT Press, pp. 67-79.

L'optimisation de la consommation électrique d'un *cloud provider*

Par Aurélien TANIÈRE
OVHcloud

OVHcloud : de l'hébergement *web* au *cloud* souverain européen

OVHcloud est une société créée en 1999 par Octave Klaba avec pour activité première l'hébergement de sites *web*. Au fil des années, l'activité s'est développée et a évolué, en fonction du marché dit du *cloud computing* (ou informatique en nuage, un concept visant à déporter les ressources informatiques au sein de centres de données, ou *data centers*, accessibles par Internet) et donc de l'évolution des usages de nos clients. Le nombre de serveurs hébergés a évolué en conséquence ainsi que les gammes de services. Dès les premières étapes de croissance franchies, plusieurs questions se sont posées sur le fonctionnement et la maintenance d'un grand nombre de serveurs, et particulièrement à propos de leur alimentation en électricité et leur refroidissement. L'équation de base étant : plus la densité de serveurs augmente dans un *data center*, plus il faut d'équipements pour refroidir le tout, sachant que ces équipements consomment de l'électricité pour fonctionner. Rapidement, l'enjeu, économique à l'époque, écologique aujourd'hui, a été de diminuer la consommation électrique d'un *data center*, ou centre de données. Dans un de ces centres, classiquement, une bonne partie de l'électricité est consommée par les systèmes de ventilation utilisés pour refroidir le bâtiment et surtout les machines. Pour rappel, plus la machine est sollicitée, en particulier le processeur, plus elle dégage de la chaleur, et, bien sûr, il faut veiller à ne pas dépasser une certaine température afin d'éviter la panne. D'ailleurs, il existe même une température optimale de fonctionnement. L'objectif est de maintenir cette température sachant que celle-ci sera influencée également par la température ambiante, c'est-à-dire la température de la pièce du *data center* qui est influencée par les autres serveurs et équipements, mais aussi par la température extérieure au *data center*. Il faut préciser aussi que maintenir le serveur à une température de fonctionnement idéale va permettre aussi de maximiser la durée de vie des composants pour que nous puissions envisager pour eux une seconde et une troisième vie, sur des machines, des services, plus accessibles mais bâtis sur des composants qui ne sont pas de dernière génération.

Dès 2003, la décision a été prise d'industrialiser en centre de données le *water cooling*. Courant chez les *gamers* PC (joueurs de jeux vidéo sur ordinateur) à la fin des années 1990, le *water cooling* consiste à refroidir son ordinateur, particulièrement le processeur, grâce à de l'eau. Un *water block* est posé sur le CPU (pour *central processing unit*, ou processeur) afin de capter la chaleur dégagée par ce dernier. L'eau froide en entrée ressort ainsi chaude et est refroidie plus loin dans le circuit, afin de repasser à nouveau dans le *water block* et fonctionner ainsi de manière cyclique. Il est donc possible de solliciter davantage le processeur sans prendre le risque que celui-ci ne brûle, car refroidi de manière performante. Ce principe a été repris chez OVHcloud afin de maîtriser le dégagement de chaleur au sein des centres de données, et ainsi réduire la consommation d'énergie liée au fonctionnement des ventilateurs.

Avant de présenter deux initiatives visant à contrôler la consommation électrique des services non productifs, et principalement le refroidissement, il est important de rappeler que, aujourd'hui, OVHcloud gère plus de 400 000 serveurs répartis dans 34 centres de données dans le monde, dont plus de la moitié sur le continent européen. Cet ensemble de machines est mis à disposition de nos

clients, qui les consomment de différentes manières sous forme de services : hébergement de sites Internet ou de boîtes mails, machines virtuelles (hôte physique découpé en plusieurs instances virtuelles) publiques (basées sur la solution code source ouvert « Open Stack ») ou privées (basées sur une solution propriétaire de VMWare), ou encore serveurs dédiés. Aujourd'hui, le marché est de plus en plus demandeur de solutions que l'on considère comme managées : un service sera apporté, par exemple un environnement pour entraîner un modèle d'intelligence artificielle, sans que le consommateur n'ait à se soucier de l'orchestration de ses ressources.

Derrière cette activité, qui paraît très logicielle d'un point de vue extérieur, il y a une réalité industrielle forte. En effet, l'intégralité des serveurs est conçue par OVHcloud sur deux sites de production : un dans la métropole lilloise et l'autre au Canada. Ce sont des milliers de serveurs qui sont produits chaque mois par les équipes, pour ensuite être « rackés » au sein d'une baie de serveurs qui est envoyée, en fonction des plannings, vers un *data center* afin d'y être branchée, au réseau, en électricité, mais aussi sur le circuit de *water cooling*, pour être mise en production. En plus de cette construction de serveurs en fonction des composants électroniques que nous commandons à des partenaires, il faut préciser que les châssis des serveurs, les baies, les structures d'accueil de ces baies et, autre exemple, les *water blocks* sont fabriqués par OVHcloud, à partir de tôle découpée et pliée automatiquement pour les deux premiers.



Figure 1. La réalité industrielle derrière le métier de *cloud provider*

La diminution de la consommation électrique par le refroidissement liquide

Selon Johnson et Marker (2009⁽¹⁾), la répartition de la consommation d'électricité dans un centre de données est de :

- 44 % d'usage par l'équipement informatique du *data center* ;
- 40 % par le système de refroidissement ;
- 16 % par le reste (UPS – *uninterruptible power supply* –, distribution de la puissance électrique, éclairage du bâtiment...).

(1) JOHNSON P. & MARKER T. (2009), "Data centre energy efficiency product profile", report to the Equipment Energy Efficiency Committee (E3) of the Environment, Water, Heritage and the Arts (DEWHA).

À partir de ces premiers chiffres, il est intéressant d'introduire le PUE, ou *power usage effectiveness*, qui est le rapport entre l'énergie totale consommée par un centre de données sur l'énergie consommée uniquement par les serveurs. Le PUE idéal serait de 1,00. Chez OVHcloud, le PUE moyen est compris en 1,10 et 1,30, alors que la moyenne mondiale des plus grands *data centers* est de l'ordre de 1,67, selon une étude datant de 2019 menée par l'Institut UpTime⁽²⁾.

Pour la gestion d'un système de *water cooling*, en circuit fermé à l'échelle d'un centre de données, le défi technique était de trouver le bon équilibre entre température de l'eau, pression, diamètre des tuyaux du circuit et débit, le tout en fonction de la température de fonctionnement de la machine, mais aussi de la météo.

La première version de notre *water block* devait dissiper 30 W à partir d'une eau à 30°C. Au fil des années, le design des *water blocks* a évolué pour être adapté à des processeurs différents : par leur dimension, mais aussi parce que les composants dégagent plus de chaleur, comme les GPU (processeurs graphiques). Par exemple, c'est en 2013 que nous avons commencé à travailler la question du cheminement de l'eau, au sein du *water block*, pour optimiser le transfert de chaleur entre le composant et, finalement, l'eau circulant dans le *water block*. C'est à cette époque que les premiers serpentins sont apparus. À partir de 2015, nous nous sommes équipés des machines nécessaires pour accélérer notre prototypage, et notamment des imprimantes 3D qui nous ont permis de rapidement expérimenter, à partir de simulation numérique, de nouveaux dessins de *water blocks*. Également, les machines nous permettant d'usiner nos *blocks* de cuivre ont aidé l'accélération du prototypage : il était ainsi possible d'avoir l'idée d'un concept, d'en faire un croquis puis une simulation numérique, et d'avoir un prototype à expérimenter en à peine quelques jours. C'est en 2015 également que nous avons revu les performances de nos *water blocks* : toujours à une température d'eau à 30°C, il fallait dissiper 120 W. Dans la poursuite de cet objectif d'amélioration des performances, deux années plus tard, en 2017, nous avons réalisé un *water block* capable d'absorber 200 W d'énergie à une température d'eau toujours à 30°C. Pour 2021, nous avons comme objectif d'augmenter la performance de nos *water blocks* à 400 W, toujours avec une eau à 30°C. En outre, pour atteindre de nouveaux critères de qualité de service, la redondance a été introduite au niveau de la baie, afin de garantir un fonctionnement du refroidissement malgré la panne d'un des deux circuits.

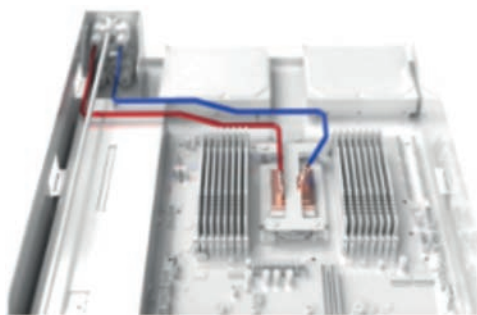


Figure 2. Illustration d'un *water block* posé sur le processeur d'un serveur conçu par OVHcloud

Ainsi, grâce à notre stratégie d'industrialisation du *water cooling* en *data center*, l'on peut estimer que, pour un centre de données consommant 1 MW au total par exemple, c'est environ 90 kW qui sont consommés par les équipements autres que les serveurs, pour un PUE à 1,10 contre 400 kW pour un centre de données avec un PUE à 1,67. Autrement dit, dans le premier cas, l'on peut octroyer 910 kW d'alimentation aux serveurs *versus* 600 kW, ce qui permet bien sûr d'augmenter le nombre mais aussi la densité de serveurs au sein d'un même bâtiment. Enfin, en théorie, pour refroidir 910 kW de serveurs

pour un *data center* avec un PUE à 1,67, il faudrait au total 1 520 kW, soit 52 % de puissance supplémentaire.

Pour approfondir les détails, plusieurs références vous sont proposées :

- articles de blog sur le *water cooling* chez OVHcloud :

(2) <https://uptimeinstitute.com/resources/asset/2019-data-center-industry-survey>

- <https://www.ovh.com/blog/water-cooling-from-innovation-to-disruption-part-i/>
- <https://www.ovh.com/blog/water-cooling-from-innovation-to-disruption-part-ii/>
- Zimmermann *et al.* (2012⁽³⁾), qui présentent les concepts de base du *water cooling* en *data center*.

La mesure de la consommation d'électricité

En tant que client d'un *cloud provider* (fournisseur de nuages en ligne), je peux être amené à louer des serveurs dédiés. Connaître la consommation d'un serveur, voire même d'une baie de serveurs, *via* mon interface client est devenu un besoin client. Côté *cloud provider*, le *monitoring* d'un serveur, d'un groupe de serveurs au sein de la baie ou de la baie de serveurs au sein du centre de données est aussi très intéressant, d'où la nécessité d'équipements dédiés à cette fonction.

À l'origine, le projet de PDU (*power distribution unit*) intelligent est parti du besoin de passer d'un appareil de distribution de puissance de 16 A en monophasé à un appareil de 32 A en triphasé, et de diminuer les risques de pannes électriques, plus particulièrement de les isoler au niveau du serveur. Ainsi, nous nous sommes fixé comme objectif de développer un équipement qui serait la combinaison de plusieurs équipements communiquant par CPL (courants porteurs en ligne). Les principaux besoins étaient de :

- diminuer l'effet d'une panne électrique sur une baie de serveurs ;
- mesurer la consommation électrique à différents niveaux (serveurs, baie, pièce et *data center*) ;
- déterminer si un nouveau serveur peut être installé dans une baie existante sur surconsommation électrique.

Ainsi a été développée une solution qui, au sein de chaque centre de données, s'implémente selon la même architecture (cf. Figure 3) :

- une armoire électrique qui distribue de l'électricité triphasée aux baies ;
- des baies de serveurs équipées chacune de PDU intelligents ;
- un coordinateur, au sein de l'armoire électrique, qui fait le pont entre les communications CPL et les communications IP.

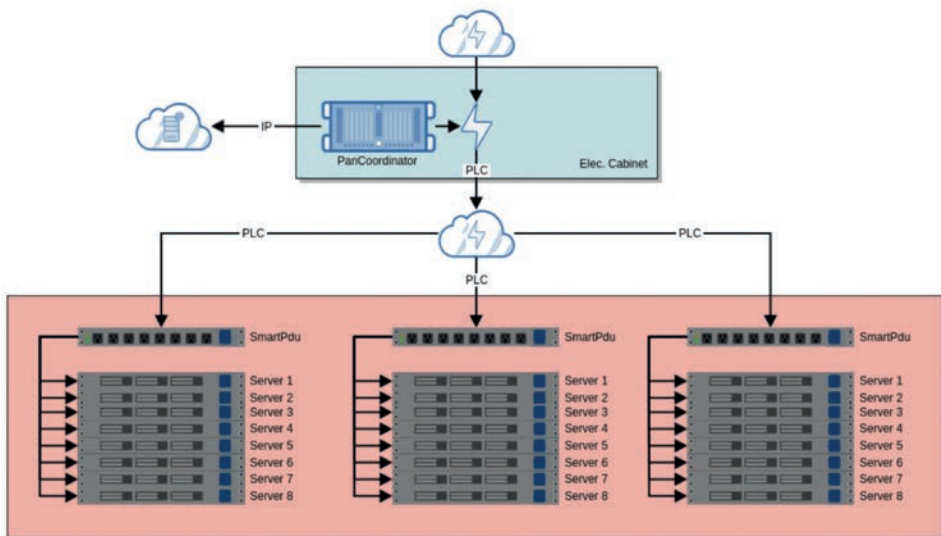


Figure 3. Vue d'ensemble du PDU intelligent et du coordinateur au sein d'un centre de données

(3) ZIMMERMANN S., MEIJER I., TIWARI M. K., PAREDES S., MICHEL B. & POULIKALOS D. (2012), "Aqasar: A hot water-cooled data center with direct energy reuse", *Energy*, p. 9.

Grâce à notre PDU intelligent, nous sommes donc en mesure de connaître, en temps réel, la consommation électrique au sein d'un *data center*, selon plusieurs échelles, comme le montre la Figure 4. Dès les résultats des mesures disponibles, nous avons envisagé des applications internes, mais aussi à destination des utilisateurs finaux. Pour notre usage interne, par exemple, il sera possible de caractériser des alimentations différentes à destination d'un même serveur. Nous pourrons aussi améliorer nos prévisions de croissance en fonction de ses mesures de consommation électrique. Au niveau de l'interface client, il sera aussi pertinent de faire remonter la consommation électrique de la machine. À partir de ces informations, nous pourrons, avec une vue globale, encourager une utilisation moins énergivore des infrastructures de *cloud computing*.

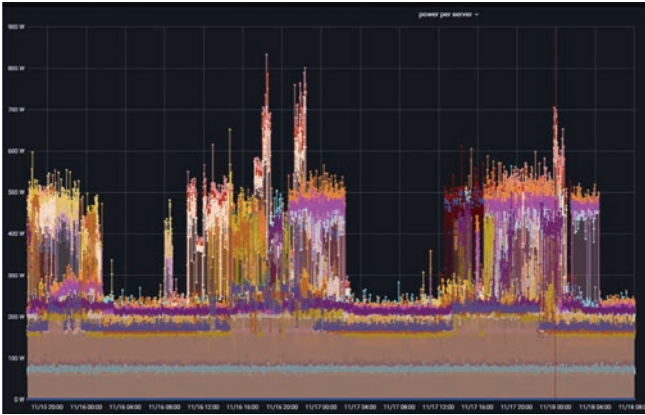


Figure 4. Graphique de la mesure par serveur, au sein d'une baie

Dans le prolongement de cet appareil, nous avons amorcé le travail sur un autre produit qui va permettre de réguler la puissance de refroidissement à partir de métriques et d'algorithmes prédictifs. Par exemple, l'on pourra imaginer jouer sur la vitesse des pompes de *water cooling* et des ventilateurs d'*air cooling* en fonction de la température actuelle, de la tendance sur son évolution, de la température extérieure et de l'utilisation des ressources que nous anticipons.

Prochain défi : la sobriété numérique et l'écoconception de services numériques

On l'a vu, les défis ont été, sont et restent nombreux. Cela dit, la marge de manœuvre au niveau du matériel s'amenuise avec le temps : l'optimisation de la consommation électrique sera de plus en plus difficile et coûteuse. En revanche, des efforts doivent être encore fournis à propos de la consommation électrique du logiciel qui est exécuté sur les infrastructures *cloud*. Aujourd'hui, estimer la consommation d'un logiciel, que ce soit celle de son développement, de son maintien ou même de son exécution, reste complexe. Par exemple, comment déterminer la consommation d'une machine virtuelle exécutée sur un hôte physique ?

Sur ce chantier, nous en sommes au début. La première étape est d'avoir la capacité de mesurer la consommation du logiciel. Ensuite, nous pourrons aborder d'autres questions : comment orchestrer les ressources pour diminuer la consommation énergétique sans dégrader la qualité de service ? Au sein d'un *data center*, mais aussi entre les *data centers*. Quelle est la meilleure stratégie de placement des données ? Un langage de programmation est-il plus écologique qu'un autre ? Comment faire prendre conscience de la consommation électrique d'infrastructures *cloud* en fonction de l'usage du client ? Toutes ces questions nous animent depuis plusieurs mois, et représentent des challenges que nous allons relever avec un institut de recherche spécialisé en informatique, et en particulier sur la question de la frugalité numérique, l'Inria.

Coévolution des systèmes électriques et informatiques du Groupe EDF depuis vingt ans

Par **Vincent NIEBEL**

Directeur des systèmes d'information du Groupe EDF

Contributeurs : les DSI de la filière numérique et SI du Groupe EDF :

Jean-Claude LAROCHE, Bruno SUTY, François RAYNAUD,
Gilles FEUILLADE, Thierry RAISON, Bertrand NACHBAUR,
Vincent GAYRARD, Stéphane TANGUY et Bruno GINOUX.

Introduction

Après l'ouverture à la concurrence des marchés européens de l'énergie au début des années 2000, l'urgence climatique et la transition énergétique impulsent une nouvelle dynamique de changement, et induisent une accélération notable du développement des énergies renouvelables non pilotables, de l'électrification des usages, du développement du stockage électrique (batteries, hydrogène), ainsi que de l'autoconsommation.

Le renforcement des exigences de sécurité et de sûreté dans le domaine du nucléaire depuis Fukushima, comme dans les réseaux de distribution avec la tempête de 1999, ou encore dans les systèmes d'information avec la multiplication des cybermenaces, impose des évolutions tangibles aux industriels concernés.

Dans cet article, nous nous proposons de présenter, sur chacun des grands métiers liés aux systèmes électriques du groupe EDF (production, optimisation, distribution et commercialisation), le rôle et l'évolution des SI (systèmes d'information) pour répondre à ces défis industriels, économiques et réglementaires.

La production nucléaire

Le parc de centrales électronucléaires d'EDF doit fournir une énergie pilotable et à bas coût, en toute sûreté et sécurité. Depuis dix ans, outre le renforcement des exigences réglementaires et de cybersécurité, le contexte de cette production a fortement évolué sous l'impulsion de deux gigantesques chantiers : l'augmentation de la durée de vie du parc existant au-delà de quarante ans d'exploitation, et le démantèlement industriel des centrales les plus anciennes.

Dans ce contexte, le SI est devenu un outil indispensable pour garantir un niveau élevé de performance, de surveillance et de conformité réglementaire. Il s'est adapté pour répondre à plusieurs objectifs :

- **l'accessibilité et la mobilité** : un réseau 4G privé et sécurisé, en cours de déploiement et évolutif 5G, permet aux intervenants l'accès au SI à tout instant et en tout lieu. De nombreuses perspectives d'usage restent encore à explorer ;
- **la sécurisation des intervenants** : grâce à des dispositifs connectés, les opérations

d'interventions en conditions difficiles, comme la localisation des travailleurs dits « isolés », sont désormais sécurisées ;

- **l'amélioration de la performance** : le levier de l'innovation et de la simulation a été fortement mobilisé : usages de l'IA pour tous les acteurs (maintenance prédictive, analyses de dysfonctionnement, optimisations, aide au diagnostic), jumeaux numériques des installations pour les modifications lourdes ou le démantèlement afin de « faire bien du premier coup », constitution d'un socle de données fiables (55 To de données de maintenance et d'exploitation, enrichies par l'IoT) ;
- **l'entreprise étendue** : le SI permet à EDF de collaborer en toute sécurité avec ses partenaires de la Filière nucléaire française ;
- **la résilience et la cyberprotection**, par construction !

Le nucléaire de nouvelle génération et son ingénierie se conjuguent également avec SI et données, au moyen d'outils de gestion des cycles de vie des centrales (PLM), d'IA ou de jumeaux numériques, pour assurer qualité de conception et sûreté, performance et industrialisation.

La production hydraulique

L'évolution du mix énergétique et le besoin de flexibilité dans des délais toujours plus courts a conduit l'électricité hydraulique, fortement pilotable, à jouer un rôle de plus en plus important au cours des vingt dernières années, tant sur un plan systémique qu'économique.

À partir de 2004, EDF Hydro a ainsi regroupé le pilotage des centrales les plus importantes sur quatre centres de conduite hydraulique, capables de modifier à tout moment les programmes de production selon les besoins. Le SI industriel a été le premier levier actionné pour s'adapter, avec le déploiement :

- d'automates d'usine et barrage, au-delà du regroupement progressif du contrôle/commande (maille vallée, régionale puis nationale), préservant une autonomie locale ;
- d'un important dispositif de diffusion d'alarmes jusqu'au domicile des intervenants d'astreinte pour compléter, si nécessaire, l'action automatique locale garantissant la sûreté à l'aval des ouvrages, notamment en période de crue ;
- des télémesures filaires ou mobiles de niveau d'eau notamment, avec l'évolution des technologies (IoT) complétant les capacités de télécommande.

Le SI s'est également appuyé sur une politique de données destinée à de multiples usages :

- le réglage en temps réel de la fréquence et de la tension nécessite la transmission de données du producteur vers le responsable de la sécurité du système électrique (RTE). Ces données permettent aujourd'hui l'optimisation de l'usage des actifs de production ;
- les données environnementales, à l'origine de prévisions hydrométéorologiques, améliorent la gestion des ouvrages en période de crue ou la gestion du stock d'énergie dans les lacs en altitude ou dans le manteau neigeux ;
- les données sur les équipements alimentent des modèles auto-apprenants pour surveiller les installations (écarts de fonctionnement ou de comportement, diagnostics de panne, optimisation de la maintenance) ;
- les échanges de données avec les partenaires institutionnels, locaux, associatifs, assurent une bonne coordination, voire une optimisation de l'ensemble des missions.

Le SI hydraulique prévoit d'augmenter davantage encore ses moyens de mesure et sa couverture réseau avec des solutions LTE (4G/5G), l'IoT et les drones, pour proposer au salarié intervenant un accès au SI ou une assistance en mobilité, tout en veillant à la cybersécurité des solutions déployées.

La production d'électricité renouvelable

Il y a vingt ans, le secteur des énergies nouvelles renouvelables en était à ses balbutiements. Les premiers acteurs, de taille très modeste (environ 10 M€ de CA), déployaient principalement de l'éolien terrestre. Les technologies renouvelables se sont progressivement diversifiées (éolien terrestre et *offshore*, solaire photovoltaïque, stockage par batteries), en parallèle d'une très forte concurrence. Le modèle de rémunération a également évolué, passant d'une garantie d'électricité à des centrales hybrides « renouvelable + stockage », rémunérées dans des schémas d'appels d'offres, d'enchères, voire même totalement sur le prix de marché.

Le SI a accompagné cette évolution en deux étapes :

- **le démarrage du SI industriel** : dès 2010, EDF RE a investi dans des systèmes de supervision de ses actifs, reposant sur un outil éditeur et quelques solutions propres. Ces systèmes sont utilisés avant tout pour la gestion des actifs de production et les activités d'opérations et maintenance (O&M) ;
- **le numérique, levier de compétitivité** : à partir de 2015, le SI restructure le pilotage des actifs industriels de plus en plus diversifiés (éolien *offshore*, stockage) autour de la donnée pour augmenter les capacités d'anticipation et d'innovation des opérateurs.

Le SI est désormais principalement composé d'un lac de données commun, et d'un système de contrôle/commande des actifs et de remontée des données. Le but de ce système est de disposer d'un ensemble cohérent, au niveau mondial, basé sur un *cloud* unique fortement cybersécurisé. Le caractère international de ce système est la clef de sa valeur ajoutée et de sa complexité. Il permet une augmentation des productibles grâce aux comparaisons, une optimisation des activités d'O&M (opération et maintenance), et, surtout, une nouvelle gamme d'offres demandée par le marché : les centrales virtuelles (*virtual power plant*).

L'optimisation amont-aval

L'ouverture des marchés de l'énergie européens a conduit ces derniers à progressivement évoluer vers des échanges toujours plus proches du temps réel, s'intégrant davantage au niveau européen et garantissant transparence et intégrité (règlement REMIT). L'Union européenne a également lancé, depuis 2017, plusieurs plateformes pour échanger des réserves d'énergie mobilisables, en moins de 30, 15 et 5 minutes (règlement "*balancing*").

Les développements de productions renouvelables diffuses et intermittentes, de nouveaux usages de l'électricité et d'outils de pilotage de la demande, ont conduit à l'apparition de nouveaux acteurs de marché, comme les agrégateurs valorisant ces actifs diffus.

Ces évolutions de marché et d'acteurs ont entraîné une forte complexification des SI pour répondre à plusieurs besoins :

- l'augmentation de la puissance de calcul pour faire tourner dans un temps toujours plus contraint des modèles d'optimisation de plus en plus complexes (intermittence, modélisation de produits, pas de programmation) ;
- l'accroissement important des échanges et flux d'informations liés à la multiplication des acteurs ;
- la réactivité proche du temps réel avec l'accélération des marchés infra-journaliers ;
- la traçabilité accrue pour répondre aux exigences réglementaires d'« auditabilité » et de transparence.

L'impact sur les systèmes d'information s'est traduit par le passage de systèmes historiques « monolithiques » verticaux, de type MainFrame, à des technologies de plus en plus agiles et

distribuées, ouvertes sur des données et services d'acteurs variés, mêlant les technologies de la *data*, du calcul de puissance (HPC) et des architectures micro-services.

Ces dernières années ont vu émerger de nouvelles technologies comme la *blockchain* pour certifier les transactions, ou encore l'intelligence artificielle pour sécuriser des processus opérationnels ou de prévision de production ou de consommation.

La distribution d'électricité

La tempête de 1999 a privé d'électricité près de quatre millions de foyers. Cet épisode a conduit le distributeur à revoir fortement sa gestion du réseau, et à lancer un grand programme de sécurisation et de développement de systèmes : SI clients en cas d'incidents ou de travaux, SI géographique (SIG) contenant la description technique des réseaux et du patrimoine industriel, outils de conduite automatisée du réseau et de pilotage des investissements.

Par ailleurs, l'ouverture des marchés le 1^{er} juillet 2004 a modifié en profondeur le dialogue avec les clients et les parties prenantes, en raison de la séparation entre distribution et commercialisation. Elle a généré de nouveaux besoins SI : un portail pour les fournisseurs et responsables d'équilibre, et un SI client.

Dans les années 2010, le rôle central du distributeur s'est fortement développé avec l'émergence de la production décentralisée et le déploiement de compteurs numériques intelligents. ENEDIS, en tant que gestionnaire du réseau de distribution, devient l'opérateur de données, au bénéfice du fonctionnement du marché, du pilotage et de la gestion du réseau, et de nombreux nouveaux services aux clients. L'architecture SI évolue pour intégrer l'explosion du nombre de serveurs (16 000 aujourd'hui) et de données (14 Po - pétaoctets).

Ce rôle central se renforce encore avec l'ambition d'une transition énergétique climatique, induisant notamment le raccordement d'infrastructures de production décentralisée et de recharge des véhicules électriques, l'autoconsommation individuelle et collective, le développement du stockage. De nouvelles fonctionnalités sont développées pour être en capacité de fournir des données à l'échelle micro-locale, au service des *smart grids*, des *smart cities* et des *smart homes*. Réseau électrique et réseau numérique évoluent désormais de concert vers un réseau d'énergie intelligent s'appuyant sur la convergence des systèmes et sur les nouvelles technologies, ainsi que sur des exigences très fortes de supervision, de maintenance et de (cyber)protection.

La commercialisation de l'électricité

L'ouverture des marchés a également fortement influencé la fonction de commercialisation : construire les nouveaux processus et conduire le changement auprès de tous les salariés, expliquer aux clients toutes ces évolutions, se confronter à la concurrence. Le SI a incarné cette mutation de la fonction commerciale, en trois phases :

- 1999-2007 : le progiciel, complété de nombreuses fonctions spécifiques au marché de l'énergie, constituait le SI commercial d'EDF. Des centres d'appels sont venus progressivement compléter les parcours clients, en parallèle de la diminution des agences EDF-GDF ;
- 2008-2018 : une refonte profonde et progressive du SI a été lancée pour faciliter l'accès aux données et accélérer les cycles de développement. Webservices, API et données, « référentiels » ont permis de construire une gestion omnicanale de la relation client. Pour gérer la vélocité, EDF Commerce a adopté la méthode « Agile à l'échelle » (SAFE 4.0), déployée en deux ans auprès de l'ensemble des équipes et managers.
- aujourd'hui, le marché, très concurrentiel, voit se développer les services de maîtrise de

la consommation, les certificats d'économies d'énergie et travaux associés, les systèmes d'autoproduction/consommation. Pour répondre à ces besoins ont été développés des services de valorisation des données de consommation, des objets connectés et des outils de fédération (*smart home*), ainsi que de nombreux services de maîtrise de l'énergie, notamment au niveau bâtementaire ou pour les réseaux de chaleur des villes. Micro-services et technologies du *cloud* (PaaS) sont pleinement mobilisés pour répondre à ces nouvelles attentes dans un système énergétique de plus en plus complexe.

Conclusion

Après l'ouverture à la concurrence et la segmentation des années 2000, les années 2010 ont connu une croissance exponentielle de la génération et de l'utilisation des données au sein du système électrique. Leur exploitation et valorisation a nécessité la mise en œuvre de toute la palette des technologies du numérique : IA, *data engineering*, IoT, *blockchain*, réseaux mobiles (4G, LoRA, WiFi).

Mais le potentiel de transformation du système électrique par le numérique est encore très important, tiré par certaines technologies :

- le *cloud* souverain ou encore les espaces souverains de partage des données faciliteront le développement d'écosystèmes, de plateformes et de nouveaux services au sein de la filière : *virtual power plant*, marché de l'hydrogène, rénovation énergétique ;
- l'IA de confiance : si les réseaux de neurones et l'IA sont déjà fortement utilisés, les systèmes critiques tels que le pilotage d'actifs industriels nécessiteront explicabilité et certification ;
- le quantique : les nouveaux usages de l'électricité sont porteurs de problématiques très complexes lors du passage à l'échelle. Ainsi, l'informatique quantique et les avancées des algorithmes d'optimisation pourraient apporter bien des réponses, aux problèmes de recharge intelligente et bidirectionnelle de véhicules électriques par exemple.

L'avenir des systèmes électriques, en raison de l'évolution de leur nature, des usages et des besoins de maîtrise, se conjuguera avec celui de leurs SI. Cette convergence constitue le socle de la transition énergétique et climatique, afin de disposer de villes, de maisons ou de réseaux intelligents. Elle comporte également de nombreux risques – cybersécurité, numérique responsable, éthique, résilience –, qu'il conviendra d'intégrer dans des schémas d'évolution désormais symbiotiques.

Intelligence artificielle et Management des ressources humaines : pratiques d'entreprises

Par **Françoise CHEVALIER**

HEC Paris, Laboratoire GREGHEC

et **Cécile DEJOUX**

Cnam, Laboratoire LIRSA

L'intelligence artificielle affecte de nombreux secteurs : la santé, le secteur bancaire et financier, le transport, le commerce, l'industrie, le droit, l'éducation... Elle irrigue aussi bien les sphères personnelles que professionnelles. Dans les domaines de la gestion, l'IA atteint d'ores et déjà la finance, les opérations, les achats, le marketing, la vente, les ressources humaines...

Qu'en est-il concrètement pour les ressources humaines ? Comment la fonction ressources humaines est-elle impactée ? Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, nous avons privilégié une approche volontairement pragmatique. Les réflexions qui suivent s'appuient sur une sélection bibliographique et nos contacts permanents avec le milieu professionnel. Elles reposent sur de nombreux entretiens auprès d'acteurs du terrain ⁽¹⁾, dont des DRH, des chefs de projets, des directeurs de la transformation digitale, des dirigeants de *start-up* en IA. Plusieurs extraits de ces entretiens émailent la réflexion et les analyses proposées, ils sont complétés par une sélection bibliographique ⁽²⁾.

La réflexion s'articule autour de trois points. Dans un premier temps, il est souligné combien l'IA est un objet polysémique et polymorphe. Dans un deuxième temps, diverses applications de l'IA dans le domaine des ressources humaines sont présentées. Dans un troisième temps sont abordées les interrogations et critiques de l'utilisation de l'IA en ressources humaines.

L'intelligence artificielle : un objet polysémique et polymorphe

Entrer dans le champ de l'intelligence artificielle n'est pas aisé. Le terme est polysémique, et l'IA est polymorphe.

Pour les uns, l'IA est présentée comme « l'automatisation des activités associée au raisonnement humain, telles que la décision, la résolution de problèmes, l'apprentissage... » (Bellman, 1978), ou encore comme la « discipline étudiant la possibilité de faire exécuter par l'ordinateur des tâches pour lesquelles l'Homme est aujourd'hui meilleur que la machine » (Rich et Knight, 1990), voire « l'étude des mécanismes permettant à un agent de percevoir, raisonner, et agir » (Winston, 1992). Dans son rapport au gouvernement ⁽³⁾, Cédric Villani souligne que « définir l'intelligence artificielle n'est pas chose facile », et qu'il est même « illusoire de chercher une définition claire ».

(1) À cet égard, nous tenons à remercier Ivan Beraud, chef de projet à La Poste, Alain Busson, professeur émérite à HEC Paris, et Kamel Bentchikou, responsable du Hub IA SNCF Réseau, pour les entretiens accordés, ainsi que la centaine d'interviewés que vous pouvez retrouver sur la chaîne YouTube « Cécile Dejoux - Transformations managériales et IA », et dans le MOOC « L'IA pour TOUS ! » sur <https://www.fun-mooc.fr/fr/>.

(2) Bibliographie volontairement restreinte dans le cadre de cet article.

(3) VILLANI C. (2018), « Donner un sens à l'intelligence artificielle, pour une stratégie nationale et européenne », Rapport au Premier ministre, mars.

Yann Le Cun définit l'IA comme l'ensemble des techniques qui imitent l'intelligence humaine et permettent aux machines de reproduire des fonctions que l'on attribue aux humains : voir, se déplacer, trier et hiérarchiser des informations, comprendre un langage, prendre une décision... Pour Peter Capelli (2017), l'IA fait généralement référence à une large classe de technologies permettant à un ordinateur d'effectuer des tâches qui nécessitent normalement la cognition humaine, y compris la prise de décision.

À cet égard, on distinguera l'IA faible (intelligence non sensible) de l'IA forte (une machine dotée de conscience, de sensibilité et d'esprit) appelée également « intelligence artificielle générale » (une machine capable d'appliquer l'intelligence à tout problème plutôt qu'à un problème spécifique) :

- « Aujourd'hui, la difficulté, c'est que personne ne s'accorde sur ce qu'est l'IA... C'est un dénominateur commun qui va de l'IA faible à de l'IA forte. Aujourd'hui, ce qui fonctionne, c'est de l'intelligence artificielle faible ou très faible même... » (chef de projet).
- « Pour moi, nous sommes plus sur de l'IA de l'ordre du discours, du marketing, que sur des processus et intelligents et artificiels » (responsable Hub).
- « Dans l'IA, à l'heure actuelle, pour moi : il y a peu d'intelligence, et peu d'artificielle... On n'en est pas encore à des systèmes d'IA, super intelligents et très loin de l'homme. On est plus sur comment aider, comment suppléer l'être humain » (chef de projet).

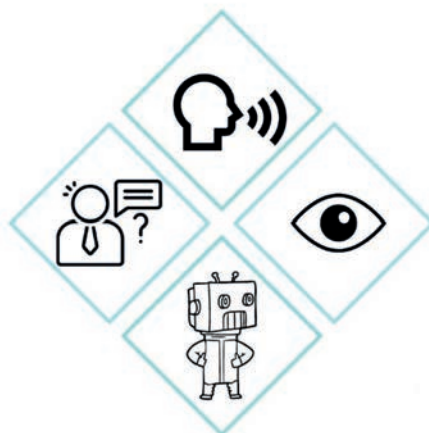
Plus encore, au-delà de ces acceptions différentes, il est frappant de constater combien le vocabulaire est foisonnant et évolue rapidement. Entre algorithme, IA conversationnelle, IA décisionnelle ou encore *machine learning*, *deep learning*, *natural language processing*, *chatbot*, *voicebot*, analyse sémantique⁽⁴⁾... se cachent de nombreuses techniques. L'IA est polymorphe, et les cas d'usage se multiplient. Rappelons dans le schéma ci-dessous ce que fait l'IA grâce à différentes technologies.

PAROLE & LANGAGE

Identification des mots, création de réponses, traduction simultanée, ex : *chatbot* pour expérience collaborateur (Randstd)

VISION

Reconnaissance d'objets, de visage, d'images, Mise en relation, ex : Analyse des sentiments lors d'un entretien d'embauche (IBM)



CONNAISSANCES

Classement, tri, analyse, prévision, prédiction, alerte, ex: GPEC en temps réel avec comparaison sur les compétences du marché externa (Saint Gobain)

ROBOTISATION

RPA (processus) et Intégration dans robot humanoïde ou *cobot*, ex : autotisation du tri des CV dans le cadre d'une préselection (L'Oréal)

Des pratiques en ressources humaines

L'adoption de l'IA dans les RH est relativement récente et ultérieure à son introduction dans d'autres domaines (marketing/vente, production, *supply chain*...) :

(4) PIPAME (pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques) (2019), « Intelligence artificielle : État de l'art et perspectives pour la France », rapport qui recense notamment les techniques de l'IA utilisées dans la sphère RH, février.

« Le capital-investissement dans des *start-up* spécialisées dans l'IA s'est en effet accéléré à compter de 2016 – il a même doublé entre 2016 et 2017 –, pour atteindre 16 milliards USD en 2017⁽⁵⁾ ».

La fonction RH apparaît comme un marché prometteur pour les *start-up*. En France, on compte à peu près 600 *start-up* innovantes en RH et numérique, dont une centaine dans la RH et l'IA, même si de nombreuses technologies sont limitées, telle l'utilisation de la reconnaissance faciale pour l'analyse des sentiments, alors qu'elles sont déjà utilisées aux États-Unis et en Chine.

L'IA est capable d'analyser une quantité de données difficiles à appréhender pour l'être humain. Aussi les tâches répétitives peuvent-elles lui être confiées, permettant aux professionnels des RH, mais aussi aux équipes et aux managers de se concentrer sur des tâches plus complexes (Dejoux et Léon, 2018 ; Dejoux, 2020), ouvrant la voie à « une expérience collaborateur augmentée ». C'est ce que l'on constate, par exemple, sur le terrain dans les aspects administratifs et juridiques de la fonction RH. Pour les autres aspects du management des ressources humaines, les applications de l'IA se révèlent différentes. L'IA peut permettre de faire correspondre une liste de candidatures avec une offre d'emploi, de proposer des formations et des orientations de carrière adaptées, de détecter les collaborateurs qui risquent de démissionner ou encore de mieux comprendre les phénomènes sociaux en entreprise.

Un soutien administratif et juridique : la voie à des gains de temps

D'ores et déjà, de nombreux supports administratifs et juridiques font appel à l'IA (assistants virtuels, *chatbots*) pour répondre de manière automatisée, en temps réel et quel que soit le lieu, aux questions posées par les collaborateurs (« où en est ma demande de formation ? », « à combien de jours de congé ai-je droit pour un mariage ? »), et renvoyer vers la documentation juridique adéquate ou le bon expert. Parmi les exemples de déploiement de l'IA dans le secteur juridique, citons celui d'EDF, qui a choisi de créer un *chatbot* juridique afin d'améliorer sa performance vis-à-vis des utilisateurs et permettre à ses juristes de se recentrer sur les dossiers à plus forte valeur ajoutée. Le *chatbot* prend en charge les questions globales autour de la gestion des absences, des demandes de congé, de la paie et de la politique salariale, des demandes liées aux aspects réglementaires de la gestion des ressources humaines :

- « Afin d'arrêter de répondre aux mêmes questions juridiques et récurrentes est venue l'idée chez EDF de créer un *chatbot* juridique, qui permet aux juristes de se recentrer sur les dossiers à valeur ajoutée. Au départ, ce *chatbot* comprenait 200 connaissances juridiques puis 800, et les utilisateurs sont satisfaits à 75 %⁽⁶⁾ » (juriste).

Il en va de même à la Poste :

- « À la Poste, pour les RH, l'IA, cela se traduit surtout en ce moment par des robots conversationnels, qui permettent de naviguer de manière intelligente dans des données complexes, volumineuses et non structurées, comme c'est le cas par exemple avec le Code du travail... On a ainsi des bases textuelles de règles, on a en fait numérisé les différentes bibles de gestion RH de l'entreprise, et l'intelligence de l'outil, c'est, face à une question, de renvoyer vers le bon corpus au bon endroit... Reste à la personne de lire le texte et de le comprendre. Le *chatbot* RH s'adresse en interne à plusieurs milliers de personnes » (chef de projet).

La paie, dans ses aspects administratifs et juridiques, est également concernée par des solutions d'IA. La fonction RH emmagasine beaucoup d'informations relatives à la paie et aux processus qui lui sont associés. Le système de paie s'accompagne aussi aujourd'hui d'une obligation faite

(5) <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/eba1ae69-fr/index.html?itemId=/content/component/eba1ae69-fr#>

(6) <https://www.youtube.com/watch?v=LE9XT-FKK7k&t=6s>

aux entreprises de transmettre mensuellement leur déclaration sociale nominative (DSN) à l'État. Il existe ainsi des intelligences artificielles qui permettent de délivrer une paye sans erreurs et de contrôler la cohérence de tous les systèmes de déclaration, à la fois en proposant des corrections et en optimisant les différents systèmes. Des robots virtuels ou logiciels programmables mettent, par exemple, en relation des factures et des clients. Ils travaillent à partir de données structurées (colonnes, lignes, champs) et peuvent être entraînés (ouvrir des mails, lire et écrire dans des bases de données, produire des rapports Excel, suivre les règles si / alors, etc.). De tels systèmes sont utilisés par de nombreuses grandes entreprises. L'IA gère également le traitement des notes de frais, en automatisant la vérification pour ne laisser à l'humain que les cas litigieux à régler. L'IA est aussi capable de proposer des *packages* d'avantages sociaux personnalisés en fonction des profils des collaborateurs.

En allégeant la fonction RH de ses tâches répétitives et chronophages, l'intégration de l'IA dite « faible » ouvre la voie à des gains de temps et de productivité.

Le recrutement : l'aide au choix des candidats

Le domaine du recrutement représente un vaste champ d'utilisation de l'IA. Toutefois, l'IA apparaît surtout utilisée pour faciliter la recherche de candidats, puisqu'elle peut traiter et trier les candidatures de manière intelligente, et identifier les profils qui répondent à une liste de critères de sélection pour un poste donné.

Pour le recrutement, le recours aux *chatbots* permet d'échanger avec un candidat sous forme de questions préenregistrées et de recueillir des informations sur les compétences, formations, contrats précédents... :

- « On est noyés sous les CV. On repère automatiquement les compétences dans les CV pour faire du tri automatique, c'est vraiment très intéressant pour nous » (DRH).
- « Ce qui marche bien, ce sont les *chatbots*. Nous avons beaucoup de robots conversationnels, par exemple sur notre site de recrutement... Notre robot conversationnel, nous l'avons élevé pas-à-pas, nous avons surveillé toutes les réponses qu'il n'apportait pas et toutes celles qu'il apportait, et nous avons corrigé. Toutes les réponses qu'il y a dans ce *chatbot* ont été apportées par l'être humain à un moment donné... En ce moment, nous travaillons sur l'interface vocale plutôt que sur l'interface clavier... Le *chatbot* recrutement s'adresse à tous les candidats potentiels » (chef de projet).
- « Ces *bots* sont là pour se substituer aux interactions de premier niveau entre la DRH ou les collaborateurs et les candidats. Cela dégage du temps pour mieux répondre aux problèmes plus importants » (chef de projet).

De nouveaux cas d'usages ont émergé au fil du temps dans le recrutement. Les méthodes d'identification des candidats correspondant aux compétences recherchées pour un recrutement sont en phase d'être réinventées. Certains algorithmes analysent sémantiquement le contenu des offres d'emploi et ciblent, au sein de bases de données internes et externes, *via* les réseaux sociaux professionnels comme LinkedIn, les CV des candidats qui correspondent le mieux aux attentes des recruteurs. Des profils de CV qui n'étaient pas présélectionnés antérieurement peuvent être ainsi repérés. Unilever utilise depuis 2016 l'IA complétée d'une approche par les neurosciences cognitives pour le recrutement. Des *start-up* proposent de faire remonter des profils de candidats sans recourir aux CV, diplômes ou expérience. Leur positionnement s'appuie sur du *matching* affinitaire, du *matching* prédictif ou la construction de *smart data*.

Il importe de souligner que, en l'état actuel, ces outils s'adressent en priorité aux entreprises ayant de forts volumes de candidatures à traiter, notamment les banques qui recrutent en masse des chargés de clientèle ou les acteurs de la grande distribution pour le métier de chef de rayon. Le

candidat est averti de ce déroulé et donne son autorisation pour que le micro et la caméra de son *smartphone* ou de son ordinateur soient activés. Ces techniques apparaissent performantes surtout pour des postes à basse qualification sur des marchés en tension. Plus les postes nécessitent de compétences élevées et complexes, plus les limites apparaissent nombreuses. Par ailleurs les candidats juniors, sans expérience professionnelle, mais avec un fort bagage de connaissances diplômantes se révèlent désavantagés. Il est intéressant de citer l'exemple du *chatbot* Randy, à la croisée du *chatbot* et du *digital coach*, qui permet d'aider le candidat à construire son CV et à lui envoyer des offres d'emploi :

- « Le candidat n'est plus en face d'un site qui lui présente des offres, mais il parle de lui, le *chatbot* apprend de lui, et à la fin de la conversation Randy va le guider vers les offres les plus efficaces ⁽⁷⁾ » (directeur de l'innovation).

Au-delà de ces pratiques, les avis divergent sur la valeur ajoutée de l'IA dans le recrutement. Pour certains, l'IA permet de susciter des candidatures, d'identifier des compétences qui n'auraient pas été prises en considération dans une démarche classique, et d'apporter une aide dans le choix des candidats ⁽⁸⁾. D'autres se montrent plus circonspects et relativisent l'apport de l'IA. Selon eux, il pourrait y avoir, en l'état actuel, « une sur-promesse ».

La formation et la gestion des compétences : la personnalisation des parcours

Avec l'IA, la formation est en passe d'évoluer d'une logique d'acquisition des compétences métiers à une personnalisation des parcours. Les techniques de formation évoluent avec le numérique (Chevalier et Fournier, 2021), avec les *learning analytics*, à savoir les données de traçage des modalités d'apprentissage (temps d'acquisition d'une connaissance, niveau de compréhension) qui permettent de représenter la façon d'apprendre des personnes et d'individualiser les propositions de développement des compétences. Ainsi, la posture de l'entreprise de proposer des contenus de formation plus ou moins numériques à destination de cibles métiers prédéfinies est en passe d'intégrer un nouveau champ qui permet qu'une partie de l'offre de formation soit individualisée grâce à l'IA (Chevalier et Kalika, 2020). Cette IA a la possibilité de soumettre des formations à suivre pour un employé selon ses centres d'intérêt et les compétences à développer.

L'IA sert également à émettre des propositions de mobilité interne aux salariés en fonction de leurs souhaits, de leurs compétences et des possibilités dans l'entreprise. Des *start-up* en IA proposent des solutions pour fluidifier la gestion de la mobilité, qui allient évaluation, formation, proposition de parcours, de postes et de programmes de développement de compétences. Toutefois, celles-ci sont limitées en France avec le RGPD (règlement général pour la protection des données personnelles), alors qu'elles peuvent être individualisées dans d'autres pays. Citons quelques solutions de GPEC (gestion prévisionnelle de l'emploi et des compétences) comme BOOSTRS qui utilise une IA pour faire la cartographie des compétences en interne comme l'explique son fondateur ⁽⁹⁾, ou Burning Glass dont l'IA scanne toutes les annonces mondiales du marché du travail afin d'aider les entreprises à faire de la GPEC en temps réel comme l'explique sa cofondatrice : « On a une taxonomie, une bibliothèque qui référence toutes les compétences. Par exemple, une entreprise internationale d'énergie cherchait à savoir quelles étaient les compétences émergentes qui sont

(7) <https://www.youtube.com/watch?v=1hwQwsgk8zY>

(8) Les algorithmes n'évaluent pas seulement la posture et l'expression du visage et du corps pour l'apparence ; ils indiquent également aux employeurs si la personne interrogée est tenace ou bonne à travailler en équipe. Ces évaluations pourraient avoir une incidence importante sur l'avenir d'un candidat. Aux États-Unis et en Corée du Sud, où l'embauche assistée par IA est devenue de plus en plus populaire, les consultants en carrière forment désormais les nouveaux diplômés et demandeurs d'emploi sur la façon de réaliser un entretien avec un algorithme.

(9) <https://www.youtube.com/watch?v=Xh16B-7e0QM&list=PLjUpJICqBjuzAzT4XkGsI-dRHLGLn2Xv9&index=11>

en train de transformer le marché de l'énergie, "quelles sont les compétences qui émergent et que je n'ai pas dans mon fichier Excel de compétences"⁽¹⁰⁾ ». Une entreprise comme Air France a testé un système d'*adaptive learning*, intégrant de l'IA, avec un programme de français (projet Voltaire) qui permet d'améliorer l'orthographe et l'expression. Ce système est fondé sur l'ancrage mémoriel (la qualité de la question génère une réponse). Un deuxième test a été déployé sur des formations d'anglais avec la *start-up* américaine Voxy, qui propose des microparcours fondés sur l'IA pour aller chercher des nouveaux contenus sur le Net en fonction de l'actualité et concevoir de nouveaux exercices rapidement⁽¹¹⁾. De son côté, Saint-Gobain a décidé d'utiliser les opportunités offertes par le *machine learning* pour améliorer sa gestion des talents. Une équipe projet composée de profils diversifiés (RH, *data scientists*, juristes, métiers, etc.) a été mise en place avec deux objectifs : identifier, grâce à l'IA, des talents non détectés par les équipes RH et managériales, et détecter les talents présentant un risque élevé de départ. La confidentialité est garantie, et aucune décision n'a été déléguée à la machine⁽¹²⁾.

La motivation et les phénomènes sociaux : mieux comprendre l'engagement

L'IA offre des perspectives pour détecter les collaborateurs qui risquent de démissionner (Rosenbaum, 2019), ou encore pour mieux comprendre les phénomènes sociaux en entreprise. Il en va ainsi de la solution développée par la *start-up* Bleexo. Une solution qui utilise l'IA pour constituer des tableaux de bord donnant à voir les variables d'engagement, de motivation et de satisfaction des collaborateurs. Le but étant de favoriser le bon développement de cet engagement de manière collaborative : « On va poser des questions chaque semaine ou quinzaine en quarante-cinq secondes au collaborateur sur des dizaines de leviers d'engagement... On anonymise, on agrège et, d'un autre côté, on va donner des tableaux de bords aux différentes parties prenantes, le DRH, le manager, un fonctionnel.... On va dire ce qui porte ou plombe l'engagement en temps réel, en apportant des conseils, etc.⁽¹³⁾ ».

DRH, managers et collaborateurs peuvent disposer, grâce à cette application, d'un tableau de bord en temps réel dans lequel les points forts et les points faibles de l'équipe apparaissent, sans bien sûr que l'on sache nominativement qui a exprimé quoi. Cela fournit un ensemble de variables qui permet d'améliorer son propre travail et sa façon d'être, et de savoir immédiatement, si l'on a mis en place une action corrective, quel est son réel effet.

Si l'intelligence artificielle peut, comme ces différents exemples en témoignent, accompagner la gestion des ressources humaines, un certain nombre de ces usages sont encore à l'épreuve. Ainsi en 2016, la *start-up* Bob Emploi affirmait qu'elle pouvait réduire de 10 % le nombre de chômeurs en France en utilisant le *big data*. Pôle Emploi a donc financé l'entreprise et lui a confié les données anonymes de chercheurs d'emploi. Deux ans et demi plus tard, son efficacité, comme celle de nombreuses plateformes spécialisées déjà existantes, était sérieusement remise en cause. Le tableau ci-après présente les applications de l'IA aux RH.

(10) <https://www.youtube.com/watch?v=zvh4FY1ATJo&list=PLjUpJICqBjuzAzT4XkGsI-dRHLGLn2Xv98&index=12>

(11) Interview d'Anne Grejbine, directrice de l'université d'entreprise d'Air France : <https://www.julhiet-sterwen.com/replay-lia-pour-de-vrai/>

(12) STERWEN J. (2020), « Vers des ressources humaines augmentées », rapport, pp. 9-12.

(13) <https://www.youtube.com/watch?v=zvh4FY1ATJo&list=PLjUpJICqBjuzAzT4XkGsI-dRHLGLn2Xv98&index=12>

Domaines RH	Activité RH augmentée par l'IA	Domaine d'application RH créé par l'IA
Recrutement	Présélection (extrait, trie, qualifie, classifie les CV)	<i>Matching</i> affinitaire <i>Matching</i> prédictif <i>Smart data</i> Analyse des traits de caractère <i>Smart assistant</i>
Recrutement	Entretiens	Individuels et collectifs fondés sur techniques RV (réalité virtuelle), RA (réalité augmentée), <i>social learning</i> Digitalisation des entretiens collectifs Prédiction du recrutement sur métiers techniques
Formation	Individualisation des contenus	<i>Learning analytics</i> Création et diffusion d'expériences pédagogiques en réalité virtuelle
Gestion des effectifs	Gestion des effectifs	Paie Recrutement Gestion de carrière et des effectifs
Qualité	Vie au travail	Développer les rencontres dans l'entreprise <i>Coach</i> virtuel Assistant virtuel au service de réunions efficaces
Rémunération	<i>Chatbot</i> Gestion de la paie Épargne salariale	Réponse aux questions Outil SaaS (<i>Software as a Service</i>) qui permet de mieux gérer les services de paiement des collaborateurs en incluant congés, absences, notes de frais, etc. Transparence et gestion de l'épargne salariale des collaborateurs
Gestion des compétences et talents	Gestion de la mobilité Systèmes intégrés	Proposition de parcours individualisés Optimisation et individualisation des parcours de compétences, talents, formation, carrière
Tableaux de bord sociaux	Optimisation de la productivité	Performance individuelle Absentéisme Engagement au travail

L'IA et les ressources humaines : des interrogations

Si les exemples de mise en œuvre de l'IA foisonnent, il n'en demeure pas moins des interrogations et des critiques. L'application de l'IA à la gestion des ressources humaines présente différents défis, parmi lesquels figurent la question des données en RH, celle du retour sur investissement et enfin celle de l'innovation dans les politiques RH.

La question des données en RH : problème de qualité et de petit nombre

L'IA s'est développée dans un premier temps dans les domaines du commercial, du marketing et de la production, où les données sont nombreuses et souvent de qualité, et où le « bénéfice *business* » paraît plus visible. Il n'en va pas de même pour les ressources humaines, où la culture du chiffre et de la donnée est différente par rapport aux autres activités de l'entreprise.

Pour les RH, un premier problème tient à la qualité des données et à leur petit nombre. Les données sont les ingrédients du management des ressources humaines et de l'IA en particulier. Leur qualité est primordiale. Si les données injectées ne sont pas de bonne qualité, les résultats seront approximatifs ou faussés :

- « Notre sujet, avant d'être intelligent, c'est d'avoir des données à peu près fiables... C'est un vrai problème dans le domaine des RH » (chef de projet).

L'exemple d'Amazon est, à cet égard, emblématique. Après avoir lancé son premier logiciel de recrutement, Amazon décide de le retirer rapidement du marché, car il s'avère que celui-ci avait tendance à privilégier les CV d'hommes. En fait, le programme informatique utilisé par Amazon s'appuyait sur les CV reçus par la société au cours des dix dernières années, et la plupart d'entre eux provenait de profils masculins, exprimant ainsi la prédominance masculine très nette présente dans le secteur des nouvelles technologies⁽¹⁴⁾. Afin de réduire ces biais, les algorithmes devraient être plus transparents, et les bases de données plus diversifiées. Ce problème de biais va également concerner très vite le domaine de la reconnaissance faciale. Seul un cadre éthique symbolisé par une charte (par exemple Orange et la charte internationale pour une IA inclusive⁽¹⁵⁾) ou des cadres de confiance provenant d'un retour d'expériences des projets IA permettront de résoudre ces questions.

La justesse de l'information ne suffit pas, encore faut-il qu'elle soit exploitable, c'est-à-dire ancrée non seulement dans un contexte mais aussi dans une durée qui favorisent son analyse et la prise de décisions :

- « On a un autre vrai sujet en matière RH, c'est que l'outil IA ne peut apprendre que s'il a de la rétroaction. Dans le domaine du *process* industriel, par exemple, la rétroaction est permanente. Or dans le domaine RH, on a peu de rétroactions. Vous prenez des décisions, mais est-ce les meilleures ou pas ? C'est tout l'enjeu de la 5G et de l'internet des objets connectés d'une certaine manière... C'est pour cela qu'en RH, on a des IA qui ne sont ni très intelligentes ni très artificielles. Les débats qu'on a sur les voitures intelligentes, on ne les a pas sur le recrutement assisté par ordinateur » (chef de projet).

Ainsi, par exemple dans la maintenance prédictive, des systèmes experts peuvent détecter, avant les êtres humains, des signes d'usure sur une machine, indiquant si celle-ci doit être révisée ou, au contraire, ne nécessite pas encore d'intervention. La collecte des données permet d'intervenir juste à temps. Il en va différemment pour les systèmes humains où les actions et réactions des personnes ne font pas l'objet de ce traçage (et faut-il qu'elles le soient ?), et peuvent s'avérer totalement imprévisibles. Se pose ici, en particulier, la question de l'évolution des systèmes d'information pour être en mesure de disposer de données de qualité :

- « L'enjeu à La Poste, c'est d'avoir des données fiables et pertinentes. C'est le cas par exemple sur les compétences. Notre problématique globale, c'est comment repérer les compétences des gens pour les pousser vers là où l'emploi est. Sachant qu'on a un sureffectif sur certaines de nos fonctions, et pour d'autres emplois on manque de gens. Cela implique de mettre en dynamique les gens et implique un certain nombre de données qu'on devrait posséder et qu'on ne possède pas vraiment très bien. Il s'agit de pouvoir repérer les compétences des gens et de pouvoir leur proposer des parcours professionnels qui pourraient permettre de maintenir leur emploi. Là, on a du mal à être intelligent, car on a un sujet de qualité des données. Les données sont bonnes pour ce à quoi elles servent, mais pas bonnes pour ce à quoi elles ne servent pas. C'est le cas pour les compétences. Par exemple, pour les compétences liées aux clients, c'est une

(14) L'Usine Nouvelle.

(15) <https://www.f2ic.fr/f2ic-portal/cms/7338-9145/orange-charte-pour-une-ia-inclusive.shtml>

compétence présente dans de nombreux entretiens professionnels de nos salariés ; mais quand on dit qu'un salarié a le sens du client, ce n'est pas la même chose pour un chargé de clientèle bancaire ou un chargé de clientèle professionnel. La notion de compétences n'est pas du tout de même nature... C'est un sujet récurrent en IA. C'est compliqué de faire tourner un système intelligent et artificiel sur ces problématiques. Il s'agit d'améliorer notre système d'information. Nous sommes en expérimentation » (chef de projet).

Le développement de la confiance vis-à-vis de la gestion des données et des solutions dotées d'IA nécessite de disposer de données fiables et éthiques⁽¹⁶⁾. C'est toute la question du *big data* en RH (Coron, 2019).

À cela s'ajoutent les contraintes imposées par de petits ensembles de données. Les ensembles de données sur les ressources humaines ont tendance à être plus petits par rapport à d'autres domaines (Cappelli, 2017). Le nombre de personnes employées, y compris dans les grandes entreprises, apparaît particulièrement faible au regard, par exemple, du nombre d'achats effectués par des clients. Dans ce dernier cas, les résultats sont aisément mesurables, et souvent déjà collectés par voie électronique. Ainsi, le nombre d'observations – ventes d'un article par exemple – est très important, ce qui rend les applications du *big data* plus facilement réalisables. La situation est bien différente dans le domaine des RH.

Signalons que la question des données prend un relief particulier pour les entreprises au niveau international. La question de la gestion de la donnée, et *a fortiori* de la gestion éthique de la donnée, est d'autant plus compliquée à l'échelle mondiale que différentes visions s'opposent, pour des raisons historiques et culturelles⁽¹⁷⁾.

La question de l'investissement et le risque de gadgétisation

Investir dans l'IA peut être onéreux, et la question du retour sur investissement se pose :

- « La difficulté avec les RH, c'est que dans beaucoup d'organisations, on n'a pas assez de données pour que le rapport entre l'investissement et le retour sur investissement soit intéressant. La question de l'IA dans le domaine des RH renvoie à un rapport coût/efficacité... Si vous avez peu d'occasions d'itérer un processus, faut-il investir dans l'IA ? » (chef de projet).
- « Il faut relooker les sites internet des entreprises régulièrement, les moderniser... Et là soyons réalistes, faire un *chatbot* vous coûtera environ 100 000 euros, alors que refaire le site de l'entreprise vous coûterait dix fois plus cher... Un *chatbot*, c'est à la mode, cela vous donne une image moderne, il y a un effet mode, et en plus c'est visible pour l'entreprise ! Ça se voit ! » (chef de projet).

Un autre risque qui guette l'IA dans le domaine des RH est celui de la gadgétisation. Nombre des *start-up* actives dans le domaine de l'IA et des RH n'ont souvent qu'une vue partielle de la fonction RH, et proposent des solutions sur un point précis sans être en mesure de les insérer dans l'écosystème local

(16) La Commission européenne s'est lancée dans une réflexion autour d'une IA éthique et responsable. En 2019, elle a défini sept principes comprenant notamment le contrôle humain, la transparence, le bien-être sociétal et environnemental, et la responsabilisation. Quarante-deux pays ont adopté les « Principes de l'OCDE sur l'IA » en 2019.

(17) Aurélie Jean (2019) identifie trois grands modèles de gestion de la donnée, volontairement simplistes, pour expliciter les oppositions idéologiques. Le modèle américain, celui des GAFAs (Google, Apple, Facebook, Amazon), développe des solutions sans nécessairement penser aux conséquences sociales, et dans lesquelles la donnée peut être vendue pour un profit. Les États-Unis sont cependant en train d'évoluer avec l'entrée en vigueur au 1^{er} janvier 2020 en Californie d'une loi sur les données personnelles. Le Congrès souhaiterait faire adopter une loi fédérale. Le modèle chinois prévoit que toute donnée appartient à l'État. Enfin, le modèle européen se caractérise par la protection des données. Cette classification met en évidence les politiques mondiales opposées en termes de gestion des données, alors que les données passent les frontières. Face aux enjeux de l'intelligence artificielle, qui se nourrit de données en masse, une réflexion sur les droits liés à la donnée et sur l'éthique des données nous semble essentielle.

et spécifique de l'entreprise. Le risque est de faire de l'IA une accumulation de gadgets. Une dérive qui, il faut le souligner, ne guette pas que l'IA mais les outils de management en général :

- « En RH, une mode chasse l'autre, nous n'avons pas fini d'installer la version 2.0 que l'on nous promet non plus le 3.0 mais le 4.0, et bientôt le 5.0... » (DRH).
- « L'IA et le virtuel sont à la mode, mais est-ce là vraiment notre priorité ? Au-delà des budgets nécessaires, je suis plutôt sceptique. Des outils RH oui, des gadgets non » (DRH).
- « Faut-il risquer la confiance que placent en nous les collaborateurs, simplement pour faire partie des "early adopters" ? » (DRH).

À cet égard, si les principaux logiciels RH disposent tous maintenant d'applications de type "dashboard" qui permettent de suivre une véritable profusion d'indicateurs RH, ne risque-t-on pas d'être noyés sous une masse d'informations dont la pertinence et l'efficacité peuvent pousser à s'interroger ? Sans un travail en profondeur sur ce point, la transformation numérique pourrait-elle se traduire par une accumulation de gadgets plus ou moins coûteux, plus ou moins utilisés ?⁽¹⁸⁾

Faut-il pour autant ne pas considérer ces applications ? Certes non. Toute la question est de ne pas sacrifier aux modes managériales, tout en sachant en tirer profit pour impulser une vision globale et innovante de la fonction RH.

La question de la « gouvernance algorithmique »

Au-delà de ces premiers constats, l'usage de l'IA peut révéler des risques, mis en évidence par Rouvroy (2017) dans ce qu'elle appelle la « gouvernance algorithmique ». Se pose, en particulier, la question de la transformation des emplois (Bettache et Foisy, 2019). C'est aussi dans cette veine critique que Cassili (2019) s'inscrit lorsqu'il cherche à dissiper l'illusion de l'automatisation intelligente et de sa possible suprématie sur l'intelligence humaine, en faisant apparaître la réalité du *digital labor*.

Face au développement de l'IA, à la multiplicité des solutions proposées par un nombre grandissant de *start-up*, nombreux sont les DRH que nous avons rencontrés à être conscients des atouts de l'IA, mais pour qui, aussi, la prudence reste de mise :

- « Alors, ai-je trouvé des professionnels RH avec lesquels échanger ? Non. Des consultants ? Oui, mais trop souvent je n'ai eu que des informations lacunaires, redites de ces fameux *business cases* et ne me permettant pas véritablement de savoir où je mettais les pieds... Quant à l'intelligence artificielle, je vous avoue ne pas l'avoir rencontrée. Face à ce constat, je m'avoue peu intéressée par l'idée de devenir une bêta-testeuse, rendue aveugle par la complexité des algorithmes et sans réelle capacité à confronter la justesse des résultats que me proposeraient ces applications. Faudrait-il risquer les qualités et la justesse de notre fonctionnement, ainsi que la confiance que placent en nous les collaborateurs, simplement pour faire partie des "early adopters" ? » (DRH).

Ces réflexions trouvent de l'écho dans diverses anecdotes partagées par les personnes interviewées, dont celle-ci :

- « J'ai candidaté pour un projet, le projet est solide, bien référencé. Et normalement, je devais être retenu... Je ne l'ai pas été. J'ai demandé pourquoi. Savez-vous ce qui m'a été répondu ? Que les projets passent au filtre d'un algorithme, et que là je ne réponds pas aux critères des projets éligibles... Moi, j'y vois une bonne façon de barrer des projets portés par des gens qui sortent des sentiers battus ; j'y vois aussi une façon de substituer au management, à l'analyse et aux choix éclairés, un automatisme qui dévitalise l'innovation... » (chef de projet).

(18) Les solutions intégrées de "HR analytics" sont pour le moment encore minoritaires.

Enfin, l'IA et la gouvernance algorithmique posent aussi la question de l'éthique dans le management. Comme pour tout outil, les usages de l'IA sont liés à ce qu'en font les utilisateurs et à leurs intentions. Lyse Langlois, directrice de l'Observatoire international de l'impact sociétal de l'IA à Laval (Canada), propose d'encadrer ces intentions par des normes et labels internationaux tels qu'elle nous le propose, dans une interview : « Les questions éthiques doivent être soulevées et demandent une capacité que l'on appelle la sensibilité éthique, c'est-à-dire la perception qu'il y a bien une problématique ou un enjeu éthique⁽¹⁹⁾. »

Conclusion – L'IA : repenser le travail et la gestion des ressources humaines

Les avis divergent sur la valeur ajoutée de l'IA dans les RH. Si les promesses de l'IA, portées en particulier par les *start-up*, sont séduisantes et les réalisations actuelles porteuses de premiers résultats, la veille et la prudence semblent de mise face à l'inclusion de l'IA dans l'écosystème RH. L'étude menée par Tambe, Cappelli et Yakubovich (2019), « Artificial intelligence in Human Resources management : Challenges and path forward », souligne l'écart entre ce que l'IA promet et les réalisations actuelles. Elle met l'accent sur les défis suivants à relever pour l'IA et les RH : celui de la complexité des calculs RH, comme le calcul de productivité des employés, dépendant de critères très variés ; celui de l'insuffisance de données fiables et basées sur la durée ; celui des contraintes légales entourant les données liées aux performances des employés, auxquelles il convient d'ajouter l'imprévisibilité des comportements.

De notre côté, il nous semble essentiel que la fonction ressources humaines soit prête à soutenir la transformation numérique de l'entreprise et à se réinventer (Daugherty et Wilson, 2018 ; Pallez, 2019 ; Chevalier et Fournier, 2020 ; Dejoux, 2020), au risque autrement d'être laissée pour compte et de voir d'autres fonctions (comme les Chief Digital Officers) intervenir en lieu et place des RH. C'est être à la croisée des RH et du numérique. Dans quelle mesure y aura-t-il une entente équilibrée entre les deux ? C'est, pour la fonction RH, intégrer aux dimensions stratégiques et économiques, humaines et sociétales, des dimensions techniques et éthiques à une vitesse accrue pour réussir les transformations. En effet, l'un des principaux enjeux qu'elle devra remporter est d'accompagner la destruction et la transformation des métiers⁽²⁰⁾.

Intelligence artificielle et gestion des ressources humaines, autant de défis et de réalisations pratiques, de promesses et de risques (Barlatier et Burger-Helmchen, 2019) qui constituent l'une des nouvelles frontières de la gestion des ressources humaines, mais aussi une nouvelle frontière pour chacun d'entre nous.

Enfin, il faut bien admettre que l'IA est une thématique qui doit être abordée avec les partenaires sociaux, car comme l'explique Franca Madinier⁽²¹⁾, de la CFDT Cadres, les partenaires sociaux ne se sont pas encore emparés du sujet : « Ces technologies sont utilisées sans que l'on en mesure suffisamment les conséquences, aussi un moratoire devrait être fait sur l'utilisation de ces applications comme celles qui identifient vos émotions avec la reconnaissance faciale, sans base scientifique ».

Références bibliographiques

BARLATIER P. J. & BURGER-HELMCHEN (2019), « L'organisation digitale : Des Ø et des 1 pour des opportunités et des risques », *Revue internationale de psychosociologie et de gestion des comportements organisationnels*, 25, pp. 5-24.

(19) <https://www.youtube.com/watch?v=DRL4SEd6EbM&t=2s>

(20) <https://oecd-events.org/ai-wips/session/232b4112-f950-eb11-b9ee-000d3a20ef5e>

(21) <https://www.youtube.com/watch?v=JRBfafDI1ag&list=PLjUpJICqBjuzAzT4XkGsl-dRHLGLn2Xv9&index=8>

- BELLMAN R. (1978), *Artificial Intelligence: Can Computers Think?*, Boyd & Fraser Publishing Company.
- BETTACHE M. & FOISY L. (2019), « Intelligence artificielle et transformation des emplois », *Question(s) de management*, 25(3), pp. 61-67.
- CAPPELLI P. (2017), "There's no such thing as big data in HR," *Harvard Business Review Digital Articles*, June 2, pp. 2-4.
- CASSILI A. (2019), *En attendant les robots. Enquête sur le travail du clic*, Paris, Éditions du Seuil, Coll. La couleur des idées, 394 p.
- CHEVALIER F. & FOURNIER C. (2021), « Numérique et innovations pédagogiques : résultats de recherches en sciences de gestion », @GRH, juin.
- CHEVALIER F. & KALIKA M. (2020) « L'entreprise académique étendue », in KALIKA M. (éd.) *L'impact de la crise sur le management*, Éditions EMS, pp. 193-200.
- CHEVALIER F. & FOURNIER C. (2020) « Education en ligne : la crise accélère la mutation », in KALIKA M. (éd.) *L'impact de la crise sur le management*, Éditions EMS, pp. 187-192.
- CORON C. (2019), « Le "Big Data RH" : Vers une nouvelle convention de quantification ? », *Gérer et Comprendre*, n°137, septembre, pp. 27-38.
- DAUGHERTY P. & WILSON J. (2018), "Humans + Machine: Reimagining work in the age of AI", *Harvard Business Review*.
- DEJOUX C. (2020), *Ce sera l'IA et moi*, Vuibert.
- DEJOUX C. & LÉONE. (2018), *Métamorphose des managers à l'ère du numérique et de l'intelligence artificielle*, Pearson.
- DEJOUX C., « Cécile Dejoux – Transformations Managériales et IA », YouTube.
- DE ROSNAY J. (2017), « De l'IA à l'intelligence humaine augmentée : impact sur l'entreprise du futur », <https://youtu.be/TIQNanJKDNw>
- JEAN A. (2019), *De l'autre côté de la machine. Voyage d'une scientifique au pays des algorithmes*, L'Observatoire.
- LE CUN Y. (2019), *Quand la machine nous apprend. La révolution des neurones artificiels et de l'apprentissage profond*, Odile Jacob.
- PALLEZ F. (2019), « Le digital labor : humain, trop humain », *Gérer et Comprendre*, 138, décembre, pp. 61-62.
- RICH E. & KNIGHT K. (1990), *Artificial Intelligence*, McGraw- Hill.
- ROSENBAUM E. (2019), "IBM Artificial Intelligence can predict with 95% accuracy which workers are about to quit their jobs", CNBC.
- ROUVROY A. (2017), « La vie n'est pas donnée », *Études digitales*, n°2, *Le gouvernement des données*, pp. 196-217.
- TAMBE P., CAPPELLI P. & YAKUBOVICH V. (2019), "Artificial Intelligence in human resources management: Challenges and a path forward", *California Management Review*.

L'utilisation de l'IA dans la gestion de la crise sanitaire

Par **Félicien VALLET**

Ingénieur au service de l'expertise technologique de la CNIL
et **Bertrand PAILHÈS**

Directeur des technologies et de l'innovation de la CNIL

De l'IA tous azimuts pour sortir de la crise

De nombreux articles de journaux grand public ont traité de l'usage de l'IA dans le cadre de la lutte contre la pandémie depuis sa survenue au début de l'année 2020 [1, 2, 3, 4]. À la lecture de ceux-ci, et comme l'indique également l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), un très grand nombre de solutions et outils faisant appel à l'IA ont été utilisés, et cela dans chaque compartiment de la réponse à la crise du Covid-19 [5]. Compréhension du virus, accélération de la recherche sur les médicaments et traitements, mais également détection, diagnostic et évolution du virus, ou encore surveillance des populations et apport aux individus d'informations personnalisées, c'est une utilisation 360° des capacités offertes par l'intelligence artificielle qui a été mise en œuvre. Cinq grandes catégories d'utilisation de l'IA lors de la crise sanitaire peuvent être dégagées.

Caractériser la maladie

L'utilisation la plus évidente de l'IA dans la crise sanitaire est celle visant à comprendre la maladie et à améliorer sa détection chez les sujets infectés. Il s'agit ainsi d'aider au diagnostic, par exemple grâce à l'analyse de tomodensitogrammes⁽¹⁾ des poumons (« CAD4COVID » de l'Université de Delft [6], « COVID-Net » de l'Université de Waterloo [7] ou encore « CT Analytics » d'Alibaba [8]), mais également d'aider au pronostic, c'est-à-dire à « prédire » l'évolution de la santé d'un patient atteint du virus SARS-CoV-2 [9, 10]. Afin de caractériser et d'anticiper la présence de la maladie, de nombreux travaux se sont penchés sur la façon d'identifier les personnes à risque et de les notifier de leur potentielle exposition au virus. La société Jvion propose ainsi la production de listes de vulnérabilité des patients [11]. Enfin, des outils permettant le contrôle et la vérification de symptômes liés à la contraction du Covid-19 ont également été implémentés. Plusieurs dispositifs de prise de température basés sur l'utilisation d'images de caméras placées dans l'espace public ont été mis en œuvre, notamment par des sociétés chinoises (Baidu [12], SenseTime [13] ou encore Megvii [14]). Une autre utilisation largement publicisée a été la détection de la présence de la maladie par l'analyse de la voix, de la toux ou encore de la respiration des individus comme proposé par les universités de Carnegie Mellon [15], de Cambridge [16] ou du MIT [17].

Informé sur la maladie

La bonne information des individus s'est avérée une pierre angulaire de la gestion de la crise de la Covid-19. En effet, face à une maladie inconnue, communiquer avec la population est apparu absolument crucial (sur la description des symptômes, l'évolution de la situation sanitaire, les modalités de transmission, etc.). Plusieurs initiatives basées sur l'IA ont permis de faciliter ces

(1) Plus communément connu sous le nom de « scanner », le tomodensitogramme est un examen médical effectué à l'aide d'une machine émettant des rayons X et permettant d'obtenir des images en coupe d'un organe.

démarches. Citons notamment la solution « Watson » d'IBM [18], grâce à laquelle des *chatbots* à même de fournir des réponses sur la pandémie ont pu être déployés par les autorités, ou, en France, le robot d'appel « AlloCovid », qui propose une orientation médicale en fonction des symptômes décrits par les individus [19]. Les aspects relatifs à l'information sur la maladie couvrent également les initiatives de modération des réseaux sociaux. Ainsi, afin de lutter contre les contenus malveillants ou conspirationnistes liés à la pandémie, l'automatisation de la modération a été renforcée sur les grandes plateformes comme YouTube [20] ou Facebook [21] ⁽²⁾.

Lutter contre la maladie

La prise en charge des malades et la recherche de solutions médicales est un autre enjeu d'importance, et pour lequel les ressources offertes par l'IA ont été utilisées lors de la crise. Cela a pu aller de la planification de ressources (estimation du nombre de places de réanimation, de respirateurs artificiels, etc.), comme proposé par l'Université de Copenhague [22], à la mise en œuvre de méthodes d'extraction automatique d'information (traitement automatique du langage) à partir de sources de données non structurées, comme par exemple la plateforme « COVIDScholar » [23]. En effet, la production scientifique a été extrêmement abondante depuis le début de la lutte contre la Covid-19, et ce ne sont, par exemple, pas moins de 100 000 articles scientifiques qui ont été référencés sur la base de données ouvertes « LitCovid » [24]. Par ailleurs, l'IA a également pu être utilisée pour prédire les structures des protéines associées avec le virus SARS-CoV-2 [25], mais également pour faciliter la remontée de signalements d'effets indésirables ; cela est le cas dans le partenariat de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) avec la société Synapse Medicine [26].

Suivre l'évolution de la maladie

Un suivi très fin et détaillé de la propagation du virus au sein des populations s'est également avéré un aspect essentiel. Pour cela, différentes solutions basées sur l'IA ont été explorées, que cela soit pour alerter sur l'apparition du virus – comme proposé par la société BlueDot [27] ou le Boston Children Hospital [28] – ou pour anticiper les taux d'incidence à venir à l'horizon de plusieurs jours ou semaines [29, 30]. Au fur et à mesure de la pandémie, les nombreuses données collectées ont également donné lieu à de nouvelles stratégies : ainsi, l'évolution rapide de la pandémie, la similarité des situations rencontrées dans un très grand nombre de zones géographiques et la mise à disposition de larges quantités de données ont permis à certains projets de tenter de modéliser automatiquement certaines réponses politiques, comme dans ce projet de l'Université de Californie à Santa Barbara [31].

S'assurer de l'exécution des mesures sanitaires

Le cinquième et dernier volet applicatif de l'IA est à distinguer des quatre précédents. Il ne s'agit pas là de mobiliser l'intelligence artificielle pour être directement aux prises avec la maladie, mais plutôt de produire des outils et applications contrôlant la bonne application des mesures sanitaires prises par les gouvernements dans le cadre de la lutte contre la pandémie. De façon notable, les méthodes d'IA déployées se basent très majoritairement sur l'analyse d'images, le plus souvent issues de caméras de vidéoprotection, et utilisent les techniques de vision par ordinateur (*computer vision*). Comme pour les dispositifs de prise de température des individus à l'aide de caméras, tous les grands acteurs chinois ont proposé de telles solutions. Ont ainsi pu être expérimentées des solutions permettant de détecter le port du masque telles que celle proposée par Datakalab [32] en France, ou encore de mesurer la distanciation sociale [33]. Il faut par ailleurs noter que la capacité à identifier les personnes a également été explorée. Ainsi, des entreprises telles que

(2) Il est à noter que ce choix a également été motivé par le fait que de nombreux modérateurs humains étaient dans l'impossibilité de travailler en raison des mesures de confinement en vigueur.

SenseTime [34] ont très tôt mis à disposition des solutions permettant de reconnaître les individus en dépit du port du masque. Le NIST (National Institute of Standards and Technology), qui met en œuvre depuis plus de vingt ans le *Face Recognition Vendor Test* (FRVT), propose, quant à lui, une tâche spécifique qui va mesurer les performances respectives de centaines d'algorithmes de reconnaissance faciale lorsque les individus portent un masque [35]. Outre les méthodes de vision par ordinateur, d'autres modalités de suivi des comportements des individus utilisant l'IA ont également été déployées, par exemple l'analyse de données téléphoniques par des opérateurs comme Orange avec sa solution « FluxVision » [36].

Notons enfin que d'autres usages de l'IA ont pu être faits dans le cadre de la lutte contre la Covid-19 comme l'utilisation de drones ou de robots semi autonomes, afin de répondre aux besoins immédiats des hôpitaux pour la livraison de repas et de médicaments, pour les opérations de nettoyage et de stérilisation, pour aider les médecins et infirmiers, ou encore pour livrer des équipements [37, 38].

La Tech – et l'IA en particulier – a-t-elle échoué ?

Si, sur le papier, l'intelligence artificielle a été très largement mise à contribution, il n'en demeure pas moins que, comme l'indique David Gruson, directeur du Programme Santé Jouve et fondateur d'Ethik-IA, l'IA n'a joué jusqu'ici qu'un rôle très subsidiaire, en particulier en France [39].

La Covid-19, cygne noir de l'IA

L'intelligence artificielle est une grande famille de techniques et de méthodes aussi diverses que nombreuses. Toutefois, ces dernières années ce sont en particulier les approches basées sur l'apprentissage automatique (*machine learning*) qui tirent la couverture à elles, au détriment d'autres méthodes telles que l'IA symbolique. Ces algorithmes, réseaux de neurones profonds (*deep neural networks*), machines à vecteurs de support (*support vector machines*) ou forêts d'arbres décisionnels (*random forests*), sont fortement dépendants des données. Dans cette famille, la technique d'apprentissage « supervisé », dans laquelle les données passées sont annotées de manière à guider l'atteinte des objectifs fixés à l'algorithme, est celle qui obtient les résultats les plus directement compréhensibles, si ce n'est les plus spectaculaires. Pour cela, il est essentiel de disposer de larges bases de données d'événements similaires dans le passé ou dans d'autres contextes, pouvant servir à « entraîner » un modèle susceptible de fournir des résultats performants sur de nouvelles données.

Or, comme le souligne Jean-Louis Dessalles, chercheur en intelligence artificielle et professeur à Télécom Paris, dans une vidéo très lucide et didactique d'avril 2020 : « Face à l'inattendu, l'IA atteint rapidement ses limites » [40]. Aucune des grandes pandémies qu'a connues l'humanité, comme la grippe espagnole, les épidémies de choléra ou de peste avant le XX^e siècle, n'a laissé de données exploitables par des algorithmes d'apprentissage du XXI^e siècle. De plus, les épidémies plus modestes des dernières décennies (SRAS, H1N1, etc.) ont eu un effet nettement plus limité : si elles constituent des sources de données très utiles pour les modèles épidémiologiques, elles ne fournissent pas d'informations historiques abondantes sur les conséquences économiques, sociales ou sanitaires de certains comportements ou de certaines mesures. Ainsi, la pandémie de Covid-19 constitue une occurrence de la théorie du cygne noir [41], en ce qu'elle bouleverse les présupposés d'une intelligence artificielle dont une des applications majeures concernerait la santé. Elle révèle également la grande faiblesse de l'IA statistique moderne : le problème de la singularité des données.

L'IA, une machine à prédire l'avenir en voyageant dans le passé

Sur un plan technique, les diagnostics obtenus grâce à l'IA n'en sont en fait qu'à leurs balbutiements, et les applications de l'IA dans le domaine médical restent étroitement liées aux domaines pour lesquels de larges quantités de données annotées sont disponibles, comme l'imagerie ou certaines études épidémiologiques. Au début de la pandémie, les images pulmonaires des malades du Covid-19 remettaient en cause les diagnostics traditionnels, et il a fallu rapidement constituer des bases d'images de référence, pour les médecins d'abord puis pour permettre à des machines de traiter correctement ces données. De même, l'étude des séquelles longues du Covid-19 demandera plusieurs années pour établir des situations suffisamment qualifiées pour nourrir utilement un algorithme.

Ces exemples illustrent la dépendance des systèmes d'intelligence artificielle aux comportements du passé. Les « prédictions » ne se fondent en effet que sur des comportements préalablement observés. Cette caractéristique fondamentale de l'IA, et de l'apprentissage supervisé en particulier, est à l'origine de nombreux débats sur la question des biais algorithmiques, ces erreurs systématiques et répétables dans un système algorithmique, qui créent des résultats dont les conséquences peuvent être dommageables aux individus. Or, en temps de crise sanitaire, les risques sont exacerbés, et certaines recherches font déjà état de présence de tels biais dans les systèmes d'aide au diagnostic de la Covid-19 [42, 43].

De ce fait, cette crise est une opportunité pour collecter des données de façon massive. De nombreuses campagnes de collecte ont été mises en œuvre auprès du grand public, par exemple afin de développer des méthodes de détection de la maladie par analyse des signaux audio comme vu plus haut [16, 44 et 45]. Par ailleurs, la mise en place de politiques de lutte contre l'épidémie caractérisées par leur forte centralisation, notamment en France, a permis de réaliser des collectes de données de population entière, en lieu et place des dispositifs fragmentés existants : à titre d'exemple, les systèmes d'information « SI-DEP » (concernant les tests Covid) et « Vaccin Covid » (sur les vaccins administrés) sont les premiers systèmes d'information rassemblant de manière complète les informations relatives à l'ensemble de la population française, fournissant ainsi un matériau qui pourra certainement être utile pour de futures études. Si toutes les informations rassemblées pendant cette pandémie serviront sans aucun doute dans le développement de nouveaux modèles en matière d'épidémiologie, mais aussi de santé publique, de répercussion économique ou de conséquences sociales, il n'y a cependant pas de garanties que l'intelligence artificielle apporte les solutions décisives qu'on en attend.

La tentation du « solutionnisme » technologique

Alors que le monde, dans sa quasi intégralité, se trouvait momentanément paralysé, la communauté des chercheurs et des développeurs en technologies du numérique et en IA a essayé, comme beaucoup d'autres communautés, de contribuer à la lutte contre la Covid-19. Le numérique a la propriété d'être facilement déployable et reproductible, et de nombreuses tentatives ont fleuri dans les premières semaines de la pandémie pour apporter une « réponse numérique » à cette dernière :

- les gouvernements, mais aussi les géants du numérique Apple et Google, ont rapidement proposé des systèmes de « suivi de contacts » fondés sur la connectivité des téléphones (« StopCovid » en France), mobilisant des protocoles cryptographiques avancés (mais pas d'IA) afin de limiter les risques pour la vie privée [46] ;
- de nombreuses applications « Covid » sont apparues sur les magasins d'applications mobiles, avant d'être, *in fine*, strictement limitées par leurs gestionnaires ;
- les entreprises, les magasins, les aéroports, etc., ont déployé des caméras thermiques, censées offrir une information fiable sur la contamination à la Covid-19 en détectant des signes de

fièvre, avant qu'il ne soit avéré que ce système ne consistait pas une mesure pertinente pour limiter la propagation de la maladie [47] ;

- en France, l'intelligence artificielle a été mobilisée pour mettre en place des algorithmes de « détection de port du masque », à des fins statistiques, dans le métro notamment [47, 48] ;
- enfin, l'idée de contrôler le confinement à l'aide de drones a été évoquée en Europe, même si les pays ayant recours à des moyens de contrôle strict des quarantaines semblent s'être appuyés plutôt sur des technologies comme le bracelet électronique [49].

Dans l'ensemble, il est apparu assez rapidement que la contribution de ces technologies, et de l'intelligence artificielle, minoritaire parmi celles-ci, était finalement plutôt relative dans le cadre de la réponse à la crise sanitaire, qui s'est appuyée avant tout sur des processus et des technologies éprouvées. Si la désorganisation massive provoquée par la pandémie fut un terrain propice pour proposer des dispositifs qui n'auraient pas trouvé de débouchés en temps normal, les principales questions se sont finalement portées sur la capacité à répondre à grande échelle à un nombre limité de besoins bien identifiés : produire des masques, des tests, des vaccins, déprogrammer des soins, recruter du personnel, etc. De plus, l'IA n'est pas suffisamment intégrée dans l'organisation actuelle du système de soins pour être mobilisée facilement. Ainsi, comme le rappelle le Conseil de l'Europe, « les difficultés structurelles rencontrées par les infrastructures sanitaires [...] ne relèvent pas de solutions technologiques, mais de l'organisation des services de santé, qui devraient pouvoir prévenir de telles situations » [50].

Conclusion

Le bilan du rôle de l'intelligence artificielle dans cette période de pandémie est encore difficile à tirer : s'il semble qu'elle a rencontré des succès dans la résolution de certains problèmes bien identifiés, elle n'a pour l'instant pas apporté LA solution à la crise. Toutefois, le pouvait-elle vraiment ? L'analyse démontre que par sa nature même, fondée sur l'utilisation massive de données, l'IA est structurellement mal armée pour faire face à l'adversité d'un tel événement. Par ailleurs, la temporalité de la crise est également un aspect déterminant. Si des initiatives technologiques ont pu être mises en place très rapidement, il est également clairement apparu que la course contre le virus était de longue haleine, et que le développement de solutions d'IA utiles prenait nécessairement du temps, que ce soit pour identifier les besoins majeurs auxquels cette IA peut répondre ou pour calibrer un système efficace. Si le discours performatif doit donc être remis en cause, l'IA n'en reste pas moins, à terme, un formidable outil pour lutter contre le virus et ses effets.

Ainsi, loin de décourager l'usage de l'intelligence artificielle, la pandémie offre une opportunité nouvelle d'analyser de nombreux facteurs avec de l'IA, comme le montrent les lauréats des « bourses Covid » du consortium formé par l'institut C3.ai, qui explorent les questions d'inégalités de logement, de modélisation épidémiologique, de stratégie vaccinale et de nombreux autres sujets [51]. Il est évident que l'apprentissage collectif que nos sociétés ont connu depuis un an donnera lieu à de nombreuses et nouvelles applications de l'IA dans les prochaines années.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Monir Azraoui pour sa contribution au travail d'indexation des usages de l'IA dans la crise du Covid-19.

Références

- [1] https://www.lemonde.fr/sciences/article/2020/05/18/comment-l-intelligence-artificielle-se-mobilise-contre-le-covid-19_6040046_1650684.html
- [2] https://lexpansion.lexpress.fr/high-tech/comment-l-intelligence-artificielle-peut-aider-a-lutter-contre-le-covid-19_2138504.html
- [3] https://www.sciencesetavenir.fr/sante/coronavirus-mais-que-fait-l-intelligence-artificielle_142811
- [4] <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/lutte-contre-le-coronavirus-quel-role-jouerait-l-intelligence-artificielle-846842.html>
- [5] <http://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/utiliser-l-intelligence-artificielle-au-service-de-la-lutte-contre-le-covid-19-0ef5d4f9/>
- [6] <https://www.delft.care/cad4covid/>
- [7] <https://arxiv.org/abs/2003.09871>
- [8] <https://www.alibabacloud.com/fr/solutions/ct-image-analytics>
- [9] <https://www.techscience.com/cmc/v63n1/38464>
- [10] <https://owkin.com/owkin-loops/covid-19-ai-severity-score/>
- [11] <https://jvion.com/>
- [12] <http://research.baidu.com/Blog/index-view?id=133>
- [13] <https://www.sensetime.com/me-en/news-detail/23783?categoryId=21072>
- [14] <https://www.prnewswire.com/ae/news-releases/megvii-deploys-ai-enabled-temperature-screening-solution-to-protect-essential-personnel-and-communities-during-covid-19-879970836.html>
- [15] <https://www.post-gazette.com/business/tech-news/2020/04/02/Carnegie-Mellon-University-School-of-Computer-Science-LTI-COVID-Voice-Detector-covid-19-coronavirus/stories/202004020156>
- [16] <https://www.covid-19-sounds.org/fr/>
- [17] <https://news.mit.edu/2020/covid-19-cough-cellphone-detection-1029>
- [18] <https://www.ibm.com/watson/covid-response>
- [19] <https://www.allocovid.com/>
- [20] <https://blog.youtube/news-and-events/protecting-our-extended-workforce-and>
- [21] <https://about.fb.com/news/2020/03/combating-covid-19-misinformation/>
- [22] <https://medicalxpress.com/news/2020-04-artificial-intelligence-covid-patients-ventilators.html>
- [23] <https://arxiv.org/pdf/2012.03891.pdf>
- [24] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/research/coronavirus/>
- [25] <https://deepmind.com/research/open-source/computational-predictions-of-protein-structures-associated-with-COVID-19>

- [26] <https://www.ticpharma.com/story/1490/covid-19-l-anism-choisit-l-ia-de-synapse-medicine-pour-la-pharmacovigilance-des-vaccins.html>
- [27] <https://bluedot.global/>
- [28] <https://healthmap.org/fr/>
- [29] <https://www.epidemictracker.com/All-Pathogens-in-China>
- [30] <https://www.technologyreview.com/2020/03/13/905313/cdc-cmu-forecasts-coronavirus-spread/>
- [31] <https://www.news.ucsb.edu/2020/019983/ai-localizes-covid-19-forecasts>
- [32] <https://www.datakalab.com/d%C3%A9tection-de-masques>
- [33] <https://camio.com/covid-19>
- [34] <https://qz.com/1803737/chinas-facial-recognition-tech-can-crack-masked-faces-amid-coronavirus/>
- [35] https://pages.nist.gov/frvt/html/frvt_facemask.html
- [36] <https://www.orange.com/fr/newsroom/actualites/2020/pourquoi-les-donnees-telephoniques-sont-elles-precieuses-pour-lutter>
- [37] <https://www.ouest-france.fr/sante/virus/coronavirus/coronavirus-robots-et-drones-en-renfort-pour-des-livraisons-sans-contact-6809541>
- [38] <https://www.lci.fr/international/video-covid-19-robots-drones-l-impressionnant-arsenal-technologique-de-la-chine-2178259.html>
- [39] <https://www.institutmontaigne.org/blog/lintelligence-artificielle-contre-le-covid-19-ameliorer-la-recherche-et-acceler-le-diagnostic>
- [40] <https://www.telecom-paris.fr/lutte-covid-19-limites-ia>
- [41] https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_du_cygne_noir
- [42] <https://www.usine-digitale.fr/article/ia-les-systemes-d-aide-au-diagnostic-du-covid-19-sont-souvent-biaises-d-apres-une-etude.N1074889>
- [43] <https://www.nature.com/articles/s42256-021-00307-0>
- [44] <https://www.voiceome.org/covid19/index.html>
- [45] <https://www.breatheforscience.com/>
- [46] <https://tousanticovid.gouv.fr/>
- [47] <https://www.cnil.fr/fr/cameras-dites-intelligentes-et-cameras-thermiques-les-points-de-vigilance-de-la-cnile-et-les-regles>
- [48] <https://www.usine-digitale.fr/article/la-detection-du-port-du-masque-dans-les-transports-par-des-cameras-intelligentes-va-pouvoir-reprendre.N1070449>
- [49] https://www.francetvinfo.fr/sante/maladie/coronavirus/confinement/le-bracelet-vous-donne-un-perimetre-de-quinze-metres-ces-francais-soumis-a-une-quarantaine-strict-e-a-l-etranger-face-au-coronavirus_4080311.html
- [50] <https://www.coe.int/fr/web/artificial-intelligence/ai-and-control-of-covid-19-coronavirus>
- [51] <https://c3dti.ai/c3-ai-digital-transformation-institute-announces-covid-19-awards/>

Résumés

06 Le numérique au service de la modernisation des réseaux d'électricité

Jacques PERCEBOIS

Le numérique permet d'assurer plus aisément l'équilibrage des réseaux en facilitant une tarification en temps réel du kWh, et en optimisant les capacités d'effacement et de stockage de l'électricité. La transition énergétique, qui s'accompagne d'une pénétration croissante d'électricité renouvelable décentralisée et intermittente, va nous obliger à gérer des millions de points d'injection et de soutirage sur les réseaux de transport et de distribution d'électricité. Cet outil numérique va jouer un rôle important pour régir l'injection croissante d'électricité intermittente, et pour opérer une meilleure interface entre les réseaux de transport et de distribution d'électricité. Le numérique permet aussi de suppléer à l'absence de réseaux interconnectés dans les pays en développement, grâce à la mise en place de solutions locales du type *pay-go*.

12 Les enjeux réglementaires du numérique dans les systèmes électriques

Ivan FAUCHEUX

Le présent article s'attache à regarder quels sont les enjeux en termes de régulation entre l'électricité et le numérique. Volontairement, les autres énergies, même quand elles sont touchées, soit directement soit indirectement par le numérique, ne sont pas abordées. Le numérique est une des deux grandes évolutions que connaît le secteur électrique avec la transition écologique. Mais, de l'utopie d'un monde parfait et sobre grâce à du numérique bien utilisé aux dystopies d'une gabegie énergétique pour des futilités, les deux extrêmes sont aujourd'hui présents dans tous les esprits. Si l'électricité et le numérique font naturellement bon ménage, tous deux utilisant l'électron (encore pour quelque temps pour le numérique) pour fonctionner, il n'en reste pas moins que les dynamiques et les sous-jacents des deux secteurs sont souvent éloignés. Quels effets donc pour la régulation du secteur de l'électricité de la révolution numérique ? Nous tentons surtout dans le présent article de donner quelques pistes de réflexion que le lecteur aura peut-être à cœur de creuser.

19 Les enjeux technologiques et industriels du numérique dans les réseaux électriques

Michel MORVAN

Un nouvel avenir se profile à l'horizon avec la digitalisation de l'énergie et l'accélération de la transition énergétique. Un moment de vérité se joue aujourd'hui pour le futur des réseaux électriques, celui du développement et de l'usage d'outils pour maîtriser les risques systémiques et l'incertitude, à mesure que cet avenir prend forme. De puissantes capacités technologiques sont et seront de plus en plus entre les mains des acteurs de l'énergie pour les aider à opérer à court, moyen et long terme la transformation des réseaux, et à mesurer l'effet considérable que leurs décisions auront sur le monde qui nous entoure.

25 **L'intégration des équipements numériques dans les systèmes électriques : quelques enjeux de politique publique pour l'Europe**

Patrice GEOFFRON

Les TIC (technologies de l'information et de la communication) constituent un levier de la lutte contre le changement climatique, à la condition que les gains induits ne soient pas annulés par les impacts environnementaux du numérique. Cette problématique fait l'objet d'un débat nourri pour déterminer si la relative stabilité de la consommation électrique des équipements TIC, observée durant les années 2010, peut être prolongée durant la décennie qui s'ouvre. Ces interrogations trouvent un point de focalisation sur le secteur des *data centers* qui, en Europe, constituent la seule activité électro-intensive à forte croissance. Nous analysons ici les déterminants de l'efficacité énergétique des centres de données, à la fois au niveau des équipements et en fonction des conditions de leur intégration dans les systèmes locaux d'énergie (électricité, mais aussi réseaux de chaleur) et de télécommunications (fibre, en particulier). Nous soulignons enfin l'objectif européen de neutralité carbone des *data centers* en 2030, et la complexité d'une telle ambition.

32 **Le cluster 5 d'Horizon Europe au cœur des problématiques des systèmes énergétiques**

Annabelle RONDAUD

Programme européen dédié au financement de la recherche et de l'innovation et doté d'un budget de 95,5 Mds€ pour 2021-2027, Horizon Europe *via* son *cluster 5* « climat, énergie, mobilité » a pour ambition de contribuer à l'atteinte de la neutralité climatique d'ici à 2050, enjeu au cœur de la politique du Pacte vert. Pour y parvenir, l'Europe doit décarboner son système énergétique qui représente 75 % des émissions de gaz à effets de serre (GES) de l'Union européenne, ce qui implique non seulement de déployer des énergies renouvelables, des capacités de stockage, d'électrifier des usages dans les secteurs des transports, de l'industrie, du bâtiment, mais également de rendre le système plus efficace, plus interconnecté et par là-même plus intégré.

Ouvert à toute entité – entreprises, organismes de recherche, universités... –, le cluster 5 propose chaque année des dizaines d'appels à propositions permettant aux participants de financer des projets de R&I collaboratifs, d'internationaliser leurs technologies, et d'élargir leurs réseaux.

37 **Green energy pricing for digital Europe**

Claude CRAMPES et Yassine LEFOUILI

Nous examinons dans cet article les arbitrages associés à la numérisation du secteur de l'énergie. Nous présentons les bons et mauvais côtés de la numérisation, en insistant sur son caractère énergivore, et étudions dans quelle mesure elle peut contribuer à rendre les systèmes énergétiques efficaces et durables. Nous examinons d'abord comment la numérisation facilite la réactivité de la demande et explorons ses implications pour la tarification à prix contingents, les effacements de demande et le service prioritaire. Ensuite, nous abordons la manière dont la numérisation peut contribuer à la décarbonation du secteur de l'énergie, et discutons des promesses et des limites de l'intelligence artificielle dans ce domaine. Enfin, nous insistons sur la nécessité pour les décideurs politiques d'accorder une attention particulière aux problèmes de confidentialité soulevés par la numérisation du secteur de l'énergie et par les cyberattaques qu'elle facilite.

42 Les plateformes numériques d'échange d'électricité

Thomas CORTADE et Jean-Christophe POUDOU

Nous nous intéressons dans cet article à l'émergence des plateformes P2P (*peer-to-peer*) dans le domaine énergétique, en présentant tout d'abord un certain nombre d'expériences, notamment celle iconique de Brooklyn, ayant comme caractéristiques communes la constitution de micro-réseaux permettant des échanges sécurisés *via* des protocoles de *blockchain*. Ensuite, nous proposons des justifications à l'émergence de ces plateformes numériques d'échange d'électricité, puis nous analysons quelques challenges à venir pour leur développement, notamment dans leur dimension économique.

48 L'effacement diffus, métier numérique associant les consommateurs à la transition écologique

Pierre BIVAS

La France a vu naître un nouveau métier mobilisant le numérique pour accompagner la transition énergétique : l'effacement diffus. Il s'agit d'installer des boîtiers chez les consommateurs volontaires pour piloter à distance des millions d'appareils électriques en temps réel et ainsi pour chacun, gratuitement, réaliser des économies d'énergie (jusqu'à - 15 %), et tous ensemble participer au pilotage et à la fiabilisation du système électrique. Techniquement, effacer des consommations évite de produire et d'acheminer l'électricité. Économiquement, cela permet de réduire les coûts pour tous. Et pour le climat, cela évite des émissions de CO₂ et facilite l'intégration des renouvelables. Tous les pays développés ouvrent donc leur marché à l'effacement comme une alternative à la production. Mais cette concurrence venue des consommateurs, souhaitée par le politique, n'est pas du goût des producteurs traditionnels qui voudraient parfois la freiner – le temps de s'adapter ?

54 Le numérique, facteur de succès de la mobilité électrique

Jean-Rémy GAD et Marc MOREAU

Les ventes de véhicules électriques ont fortement progressé, mais leur usage généralisé se heurte encore à des freins, pour l'essentiel du côté de l'infrastructure de charge. Le numérique et la donnée jouent un rôle-clé pour mieux concevoir et mieux opérer ces infrastructures en cohérence avec le reste du système électrique, et pour simplifier l'expérience client.

61 Integration of electromobility with the electric power systems: The key challenges

Yannick PEREZ et Wale AROWOLO

The ongoing energy transition is rapidly transforming the traditional electric utilities. While it attempts to combat the menace of climate change and stimulate green growth with clean transport (electromobility), renewable energies, and energy efficiency, the energy transition comes with new challenges for the electric utilities. Some of the challenges are the technical, market design and regulatory frameworks to integrate electromobility with the subsisting power systems. This paper discusses the integration challenges. Furthermore, it attempts to provide an analytical framework for the stakeholders and decision makers (especially the policy makers and regulatory authorities) to address the market design and regulatory challenges.

67 La transition vers l'électricité pour des milliers de bus à la RATP : la puissance du numérique au service d'un projet titanesque

Agathe BASTIT et Felix von PECHMANN

Le projet de bus électriques de la RATP est l'un des projets les plus ambitieux au monde : plusieurs milliers de bus, remplacés un pour un, rechargés en milieu urbain dense. Sa mise en place opérationnelle a soulevé de nombreuses questions techniques et organisationnelles. La recharge des véhicules sera-t-elle possible ? Les autonomies suffisantes ? Cet article met en lumière l'apport indispensable du numérique à chaque phase du projet. En amont, pour simuler l'utilisation des autobus électriques et valider la faisabilité technique du projet. En aval, pour expertiser chaque nouvelle brique de ce système complexe et déployer de nouveaux outils de supervision, qui ont permis de mieux impliquer l'ensemble des parties prenantes.

74 Suivre ses kilowattheures sur le compteur communicant d'électricité ? Une enquête sur les pratiques ordinaires de comptage domestique

Aude DANIELI

Parmi l'ensemble des outils numériques permettant aujourd'hui de suivre ses consommations dans le champ des "*smart grids*", les compteurs communicants d'électricité tels que Linky occupent une place à part puisque huit Français sur dix en sont équipés. Conformément à la loi française du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, les compteurs communicants sont présentés au service de la transition énergétique (tarification horaire, interruption des appareils ménagers en période de pointe, gestion de l'autoproduction). Cet article aborde l'adoption de ces outils, toutes générations de compteurs d'électricité confondues. Notre enquête montre que les clients embarquent marginalement des préoccupations de gestion des dépenses des foyers, qui frisent parfois l'illégalité. Le quasi-rejet de ce qui est considéré comme une infrastructure de réseau technique est majoritaire parmi les personnes interviewées.

84 L'optimisation de la consommation électrique d'un *cloud provider*

Aurélien TANIÈRE

Le numérique est de plus en plus pointé du doigt comme étant un secteur polluant. En particulier, l'apparition de *data centers* géants hébergeant des dizaines de milliers de serveurs pose question (voir article : <https://www.theguardian.com/environment/2020/jan/06/why-irish-data-centre-boom-complicating-climate-efforts>), notamment lorsqu'il s'agit de les alimenter en électricité. Cela dit, il sera toujours plus écologique de mutualiser plusieurs clients sur un même serveur, au sein d'un centre de données, que chaque client disposant d'un serveur unique chez lui, comme l'indique l'étude de l'IEA ("Global trends in internet traffic, data centre workloads and data centre energy use, 2015-2021"). D'autant plus que, d'un point de vue carbone, l'impact du numérique est plus fort sur les phases de fabrication et de transport que sur les phases d'utilisation.

Dans cet article, quelques initiatives visant à mesurer et à optimiser la consommation électrique d'un *data center*, aussi bien au niveau matériel que logiciel, sont expliquées.

89 Coévolution des systèmes électriques et informatiques du Groupe EDF depuis vingt ans

Vincent NIEBEL

Depuis vingt ans, le système électrique opéré par le Groupe EDF est confronté à de multiples défis. L'ouverture à la concurrence des marchés européens de l'énergie, le développement des énergies renouvelables et la transition énergétique vers une électrification massive des usages ont bouleversé ses équilibres économiques, ses infrastructures techniques et son environnement réglementaire.

Le système d'information, ayant connu des évolutions tout aussi spectaculaires, a accompagné ces mutations des activités de l'énergie : production, optimisation, distribution et commercialisation.

La numérisation des services a progressivement rapproché systèmes énergétiques et informatiques, au point de considérer aujourd'hui, et demain, ces deux domaines comme un système convergé : un réseau d'énergie et de services intelligents, s'appuyant sur les données et les technologies actuelles, ou à venir (moyens de production et de stockage d'énergie, réseaux, IoT, IA, 5G, quantique, cyber).

HORS DOSSIER

94 Intelligence artificielle et Management des ressources humaines : pratiques d'entreprises

Françoise CHEVALIER et Cécile DEJOUX

L'intelligence artificielle affecte de nombreux secteurs : la santé, le secteur bancaire et financier, le transport, le commerce, l'industrie, le droit, l'éducation... Elle irrigue aussi bien les sphères personnelles que professionnelles. Dans les domaines de la gestion, l'IA atteint d'ores et déjà la finance, les opérations, les achats, le marketing, la vente, les ressources humaines... Qu'en est-il concrètement pour les ressources humaines ?

La réflexion s'articule autour de trois points. Dans un premier temps, il est souligné combien l'IA est un objet polysémique et polymorphe. Dans un deuxième temps, diverses applications de l'IA dans le domaine des ressources humaines sont présentées. Dans un troisième temps sont abordées les interrogations et critiques de l'utilisation de l'IA en ressources humaines.

106 L'utilisation de l'IA dans la gestion de la crise sanitaire

Félicien VALLET et Bertrand PAILHÈS

Avec des faits marquants tels que la victoire du logiciel AlphaGo de la société DeepMind contre le champion du monde du jeu de go Lee Se-Dol, l'intelligence artificielle (IA) est sortie du champ scientifique pour investir l'imaginaire collectif. Portée par ses prophètes et mystiques, discréditée par ses sceptiques et incroyants, l'intelligence artificielle est, depuis le milieu des années 2010, le nom des changements technologiques profonds que sont amenées à connaître nos sociétés. Début 2020, avec l'irruption de la crise de la Covid-19, aussi subite qu'inattendue, l'intelligence artificielle affrontait pour la première fois un ennemi à la mesure du phénomène sociotechnique qu'elle était désormais devenue. Aux éloges et aux célébrations de ses capacités théoriquement sans limites semblait ainsi succéder une authentique mise à l'épreuve. Un an plus tard, force est de constater que les succès de l'intelligence artificielle dans la grande bataille contre la Covid-19 ont été moins nombreux et spectaculaires qu'escomptés au départ.

Abstracts

06 Digital technology at the service of modernizing electricity grids

Jacques PERCEBOIS

Digital technology already makes it easier to balance networks by facilitating real-time pricing of kWh and by optimizing electricity saving and storage capacities. The energy transition, which is accompanied by a growing penetration of decentralized and intermittent renewable electricity, will require us to manage millions of injection and withdrawal points on the electricity transmission and distribution networks. This digital tool will play an important role in regulating the growing injection of intermittent electricity, and in providing a better interface between the electricity transmission and distribution networks. Digital technology can also be used to compensate for the lack of interconnected grids in developing countries, through the implementation of local solutions such as pay-go.

12 Digital technology in electricity systems: Regulatory issues

Ivan FAUCHEUX

IT and energy have developed complex and ambiguous relationships, especially since the boom of the mass consumer products and the development of the data science, both using more and more energy. On the other side, the energy transition, triggered by the urgency to fight against an uncontrollable climate change, needs more and more IT to be efficient and, especially on the consumer side, to reach most of the consumers to assist and ease the adaptation of their behavior. The article is only dedicated to point out some regulatory issues, just as the beginning of an impressionist painting: the rapid pace of the IT development confronted to the long-term rhythm of energy is a rationale for the regulation at the cross-border of these two sectors to remain open, agile, and reactive.

19 Digital technology in electricity grids: Technological and industrial issues

Michel MORVAN

A moment of truth has arrived for electrical networks: a new future beckons with the digitalization of energy and the energy transition accelerating, just as the new tools to control systemic risks and uncertainty of this future are being developed and deployed. Powerful technological capabilities will be or already are in the hands of energy actors to help them drive short, medium and long term grid transformation, and measure the significant impact their decisions will have on the world around us.

25 Incorporating digital devices in electrical systems: Public policy issues for Europe

Patrice GEOFFRON

ICTs are a lever in the fight against climate change, provided that the gains made are not cancelled out by the environmental impacts of digital technology. This issue is the subject of intense debate to determine whether the relative stability of electricity consumption by ICT equipment, observed during the 2010s, can be extended into the next decade.

These questions are focused on the data center sector which, in Europe, is the only fast-growing electro-intensive activity. Here we analyze the determinants of data center energy efficiency, both at the equipment level and according to the conditions of their integration into local energy (electricity, but also heat networks) and telecommunications (fiber, in particular) systems. Finally, we emphasize the European objective of carbon neutrality for data centers by 2030, and the complexity of such an ambition.

32 Horizon Europe's Cluster 5: Problem-solving for energy systems

Annabelle RONDAUD

Cluster 5 “Climate, Energy, Mobility” is part of Horizon Europe, the EU’s key funding program for research and innovation with a budget of €95.5 billion for 2021-2027. Cluster 5 is devoted to the attainment of climate neutrality by 2050, a key issue in the Green Pact. To reach this goal, Europe has to decarbonize its energy system, which accounts for 75% of EU emissions of greenhouse gases. This implies not only developing renewable sources of energy, storage capacities, and electrification in transportation, manufacturing and the building trades but also making the electricity system more efficient, more interconnected and, thereby, more integrated. Open to firms, research organizations, universities, etc., Cluster 5 proposes dozens of tenders every year. Participants can thus obtain funding for collaborative R&D projects, internationalize their technologies, and broaden their networks.

37 Green energy pricing for digital Europe

Claude CRAMPES & Yassine LEFOUILI

This paper investigates the trade-offs associated with the digitalization of the energy sector. Arguing that digitalization has both bright and dark sides, we study the extent to which it can help make energy systems efficient and sustainable. We first discuss how digitalization affects the responsiveness of demand, and explore its implications for spot pricing, load shedding, and priority service. In particular, we highlight the conditions under which digital technologies that allow demand to be more responsive to supply are likely to be used. We then turn to the way digitalization can contribute to the decarbonization of the energy sector, and discuss the promises and limitations of artificial intelligence in this area. Finally, we contend that policymakers should pay special attention to the privacy concerns raised by the digitalization of the energy sector and the cyberattacks that it enables.

42 Digital platforms as electricity exchanges

Thomas CORTADE & Jean-Christophe POUDOU

This paper focuses on the emergence of P2P platforms in the energy sector. We first present diverse experiments, in particular the iconic one in Brooklyn. They share several common features, such as the building of microgrids that allow secure exchanges via blockchain protocols. We then propose justifications for the emergence of these digital electricity-trading platforms, and we analyze some of the economic challenges for their future development.

48 **Distributed load shedding: Associating consumers with the environmental transition**

Pierre BIVAS

A new digital business for electricity was invented in France: involving widespread demand response via aggregation to participate in the electricity wholesale markets is now a solution to both save energy for participating consumers (-15%) and reduce costs for all as well as CO₂ emissions, alleviate grids, and facilitate the efficient use of renewable energy.

Smart boxes are installed, free of charge, in homes and offices to connect and monitor simultaneously millions of electrical appliances, and reduce their consumption to match system needs. Because reducing demand is a way to avoid generating electricity, widespread demand response aggregation may participate in wholesale markets as an alternative to generation, thus pushing prices down and benefitting all consumers. Such competition from the demand side, empowering consumers, and supported by policies worldwide, may not always be the traditional generators' cup of tea – until they get ready and fully endorse climate policies?

54 **Digital technology, a factor of success for electric forms of mobility**

Jean-Rémy GAD & Marc MOREAU

Electric vehicle sales have grown strongly, but the widespread use of such vehicles is still throttled, mainly by the lack of charging stations. Digital technology and data can be the keys to improving the design and operation of this new infrastructure in consonance with the rest of the electricity grid and thus simplifying the customer's experience.

61 **Integration of electromobility with electric power systems: The key challenges**

Yannick PEREZ & Wale AROWOLO

The ongoing energy transition is rapidly transforming traditional electric utilities. While it attempts to combat the menace of climate change and stimulate green growth with clean transportation (electromobility), renewable energies, and energy efficiency, the energy transition also brings new challenges for electric utilities. Some of these challenges are the technical, market design and regulatory frameworks to integrate electromobility with the subsisting power systems. This paper discusses the integration challenges. Furthermore, it attempts to provide an analytical framework for the stakeholders and decision makers (especially the policy makers and regulatory authorities) to address the market design and regulatory challenges.

67 **The transition toward electricity for thousands of buses at the RATP: Digital technology's power at the service of a daunting project**

Agathe BASTIT & Felix von PECHMANN

RATP's electric bus project is one of the most ambitious in the world: several thousand buses, replaced one for one, charged in dense urban areas. Its deployment raised several technical and organisational questions. Would it be possible to recharge the vehicles? Would the ranges be enough for the trips? This article highlights the indispensable contribution of digital tools and data analysis at each phase of the project. Upstream, to

simulate the day-to-day use of electric buses and validate the technical feasibility of the project. Downstream, to assess each new module in this complex system and deploy new supervision tools that helped involving all the stakeholders.

74 Keeping track of kilowatt-hours on a smart electricity meter? A survey on household meters

Aude DANIELI

Among the digital tools for keeping track of consumption, smart meters (such as Linky) have a special place on France's electricity grid, since eight out of ten households are already equipped with one. In compliance with the TECV Act on the energy transition for green growth of 17 August 2015, smart meters are at the service of the energy transition (hourly pricing, interrupting the operation of household appliances during peak periods, managing the household production of electricity). Among the persons interviewed during a survey on how smart meters (of all generations) have been adopted in actual practices, a majority more or less reject what is considered to be a network infrastructure. As this survey has shown, clients very infrequently take account of the preoccupations of households with controlling outlays, and some of their practices are on the borderline of being illegal.

84 Optimizing a cloud provider's electricity consumption

Aurélien TANIÈRE

Digital technology is increasingly being singled out as a polluting sector. In particular, the emergence of giant data centers hosting tens of thousands of servers has raised questions, especially when it comes to powering them. However, it will always be more environmentally friendly to host several customers on the same server, within one data center, than each customer having a single server at home, as a IEA study shows. Especially since, from a carbon perspective, the impact of digital technology is stronger on the manufacturing and transport phases than on the use phases. In this article, we will explain some initiatives aimed at measuring and optimizing a data center's power consumption, both hardware and software.

89 The coevolution of electricity and computer systems at EDF over the past twenty years

Vincent NIEBEL

For the past twenty years, the electrical system operated by EDF Group has been facing multiple challenges.

The opening up of European energy markets to competition, the development of renewable energies, and the energy transition towards massive electrification of uses have disrupted its economic balances, technical infrastructures, and regulatory environment.

The information system, having known equally spectacular evolutions, has accompanied these changes in energy activities: production, optimization, distribution, and marketing. The digitalization of services has gradually brought energy and IT systems closer together, to the point of considering these two domains today, and tomorrow, as a converged system: a network of energy and intelligent services based on current and future data and technologies (production and storage of energy, networks, IoT, AI, 5G, quantum, cyber).

Miscellany

94 **Artificial Intelligence and human resource management: Corporate practices**

Françoise CHEVALIER & Cécile DEJOUX

Artificial intelligence has an impact on several sectors (health, banking and finance, transportation, retail business, manufacturing, the law, education, etc.). It affects both the personal and occupational spheres. In management, AI has already had an impact on finance, current operations, procurement, marketing, sales, human resources... What can be said concretely about AI in human resource management? After pointing out that AI is a polysemous, polymorphous topic, this article presents various AI applications in this field. It then discusses the questions and criticisms related to uses of AI in human resources.

106 **Using artificial intelligence to manage the health crisis**

Félicien VALLET & Bertrand PAILHÈS

With significant events such as the victory of DeepMind's AlphaGo software over the world champion of the game of Go, Lee Se-Dol, artificial intelligence (AI) has emerged from the scientific field and entered the collective imagination. Carried by its prophets and mystics, discredited by its skeptics and unbelievers, artificial intelligence has been, since the mid-2010s, the name of the profound technological changes that our societies are about to experience. At the beginning of 2020, with the outbreak of the Covid-19 crisis – as sudden as it was unforeseen –, artificial intelligence faced for the first time an enemy commensurate with the socio-technical phenomenon that it had now become. The praises and celebrations of the theoretically limitless capacities of artificial intelligence seemed to be followed by a real test. One year later, we have to admit that the successes of artificial intelligence in the great battle against Covid-19 have been less numerous and spectacular than initially expected.

Ont contribué à ce numéro

Wale AROWOLO is a post-doctoral researcher in energy economics at the Armand Peugeot Chair at CentraleSupélec, Paris Region, France. He is a qualified project manager (PMP) and holds a PhD in Economics from Paris Sud University, France. His area of expertise is in power generation project management, market design and reform, institutional design, regulatory economics, and public energy policy. He contributes to knowledge with applied research on power sector and electric mobility issues to inform public energy policy choices.

→ *Integration of electromobility with the electric power systems: The key challenges*

Edmond BARANÈS est professeur d'économie à l'Université de Montpellier. Ses principaux thèmes de recherche sont l'économie industrielle, la politique de la concurrence et la réglementation en la matière. Ses travaux s'intéressent en particulier aux marchés de l'économie numérique, de l'énergie et de la santé.

→ *Introduction*

Agathe BASTIT est ingénieur civil des Mines de Nancy. Précédemment responsable d'études système centre bus électrique du programme bus2025 de la RATP, elle est désormais responsable maintenance du centre bus de Lagny (Paris 20^e, premier centre bus électrique de la RATP). Ses domaines d'expertise incluent la mobilité électrique (matériel roulant, infrastructures électriques, système de supervision) : étude, mise en œuvre opérationnelle, fiabilisation et maintenance.

→ *La transition vers l'électricité pour des milliers de bus à la RATP : la puissance du numérique au service d'un projet titanesque*

Pierre BIVAS est ingénieur au Corps des mines et cofondateur de Voltalis. Il a créé successivement des activités mobilisant le numérique au service de la sécurité, de la santé et maintenant de la transition écologique.

→ *L'effacement diffus, métier numérique associant les consommateurs à la transition écologique*

Françoise CHEVALIER, docteur HEC et HDR, est professeur associé à HEC Paris, dans le département Management et Ressources Humaines. Elle a été chercheur visitant à l'Université de Californie, Berkeley. Ses travaux portent sur le *leadership* et le changement. Présidente des jurys Prix de thèses FNEGE (Fondation nationale pour l'enseignement de la gestion) en 2019 et 2020, Françoise est spécialisée en méthodes de recherche qualitative. Elle a dirigé plusieurs thèses de doctorat HEC primées aux niveaux national et international.

→ *Intelligence artificielle et Management des ressources humaines : pratiques d'entreprises*

Thomas CORTADE a obtenu son doctorat à l'Université de Montpellier en 2005. Nommé maître de conférences à l'Université de Lorraine, il rejoint la faculté d'économie de Montpellier en 2017 et le laboratoire de recherche Montpellier Recherche en économie. Ses domaines de recherche sont l'économie industrielle et l'économie du droit. Il s'intéresse à des thématiques comme l'économie des réseaux, l'économie numérique, la politique de la concurrence, la réglementation, et les litiges. Il participe au projet POTEM, lauréat de l'appel à projet de l'I-Site MUSE porté par Montpellier Université d'excellence, dont la problématique s'intéresse aux échanges d'énergie de pair-à-pair. Ses articles de recherches ont été publiés dans des revues françaises comme *La revue d'économie politique* ou *Économie et Prévision*, et dans des revues internationales comme *International Review of Law and Economics*.

→ *Les plateformes numériques d'échange d'électricité*

Claude CRAMPES a obtenu le doctorat ès sciences économiques de l'Université de Toulouse en 1975. Il est aujourd'hui *professor émérite* à la Toulouse School of Economics (TSE), Université Toulouse Capitole. En sus de ses activités d'enseignement, il a participé aux travaux de la Commission de régulation de l'énergie (1999-2001) et a été consultant pour la Banque mondiale (1995, 1998, 2005). Dans ses relations avec les industriels, il a principalement collaboré avec Iberdrola (1993-2000) et EDF (depuis 2001). Ses domaines de recherche couvrent l'économie des réseaux, l'économie industrielle, la régulation, et l'économie de l'énergie et du climat. Ses travaux ont été publiés dans : *International Journal of Industrial Organization*, *RAND Journal of Economics*, *Journal of Industrial Economics*, *Journal of Regulatory Economics*, *Oxford Review of Economic Policy*, *Resource and Energy Economics*, *Journal of Network Industries*, *Energy Journal*, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, *Journal of Energy Storage*, *Annals of Economics and Statistics*.

→ *Green energy pricing for digital Europe*

Aude DANIELI est chercheuse postdoctorale en sociologie à Orange Labs (SENSE), enseignante et chercheuse associée au LATTS à l'Université Gustave Eiffel. À travers une importante enquête de terrain, son précédent travail de recherche et sa thèse portaient sur les mises en débats des processus d'innovation des *smart meters* « Linky », et en particulier les formes de prescription économique et morale des comportements sociaux qui les sous-tendent. Elle s'intéresse aux effets du numérique sur les représentations du monde social, et conduit actuellement des recherches sur le paysage émergent de la *sleeptech* et ses outils de surveillance du sommeil, ainsi que sur les pratiques sociales de l'argent liquide et dématérialisé mises en œuvre par les professionnels du marché. Son travail cherche à articuler une analyse des transformations des dispositifs technologiques à l'ère du numérique et les dynamiques d'appropriation professionnelle et domestique de dénonciation et de banalisation des infrastructures marchandes.

→ *Suivre ses kilowattheures sur le compteur communicant d'électricité ?*

Une enquête sur les pratiques ordinaires de comptage domestique

Cécile DEJOUX, professeur des universités au Cnam et affiliée à l'ESCP BS. Fondatrice et directrice de l'observatoire du futur du travail et du management, le Learning Lab Human Change au Cnam. Conférencière, auteur et créatrice des MOOCs francophones les plus suivis sur Fun (350 000 auditeurs dans 148 pays) : "Du manager au leader : devenir agile et collaboratif", "L'IA pour tous", "Management post-Covid". Animatrice d'une chaîne YouTube : "Les jeudis de la transformation managériale à l'ère du numérique et de l'IA" (<http://ceciledejoux.com>).

→ *Intelligence artificielle et Management des ressources humaines : pratiques d'entreprises*

Ivan FAUCHEUX, ingénieur général des mines, ancien élève de l'École normale supérieure et agrégé de mathématique, est depuis le 5 août 2019 membre du collège de la Commission de régulation de l'énergie.

En 2000, il débute sa carrière à la préfecture de la région Île-de-France en tant que chargé de mission, où il assure notamment le suivi budgétaire du contrat de plan État-Région et le soutien à l'investissement. Il rejoint en 2002 le ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie en tant que chef du bureau de la microélectronique, où il est responsable également de l'élaboration et de la mise en œuvre de la politique des pôles de compétitivité pour le compte du ministère, avec la DATAR.

En 2006, il est nommé sous-directeur des filières des matériels de transport, de l'énergie et des éco-industries à la direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services du ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi. Il prend en charge l'animation des secteurs industriels et du soutien public à des projets de recherche et de développement, ce qui aura pour résultat la

mise en place du premier fonds démonstrateur de recherche de l'ADEME en 2008. En 2010, il rejoint les services du Premier ministre au Commissariat général de l'investissement pour le poste de directeur de programme énergie et économie circulaire. En 2018, il entre au Conseil général de l'économie pour des missions d'expertise et de conseil en appui aux politiques publiques portant sur le verdissement des transports ferroviaires, ou encore sur les solutions de stockage pour le système électrique national.

→ *Les enjeux réglementaires du numérique dans les systèmes électriques*

Jean-Rémi GAD est président de TMS, expert judiciaire près la Cour d'appel de Bordeaux.

Il est ingénieur ESTIA et diplômé d'un executive MBA du Groupe HEC/CPA. Il exerce depuis plus de trente ans dans le domaine de la mobilité et de l'énergie.

Il a monté et piloté des projets d'innovation dans le domaine des *smart grids* pour le compte du groupe Veolia environnement, pour lequel il a été directeur des projets électromobilité entre 2009 et 2016.

Il a notamment participé aux réponses aux grands projets du groupe d'auto-partage électrique (Autolib, Nice Auto-Partage, Sunmoov Lyon...) et a commencé à travailler sur les modèles économiques de déploiement d'infrastructures de charge pour véhicules électriques.

Il intervient actuellement en tant que conseil pour des agglomérations ou des entreprises intervenant en tant qu'opérateurs de services de charge, et en tant qu'auxiliaire de justice pour le compte du ministère de la Justice.

→ *Le numérique, facteur de succès de la mobilité électrique*

Patrice GEOFFRON, docteur en économie industrielle, est professeur à l'Université Paris-Dauphine, dont il a été président intérimaire et vice-président international. Il en a également dirigé le Laboratoire d'économie (LEDA) de 2007 à 2015. Il est professeur invité à l'Université Bocconi de Milan depuis plusieurs années, ainsi que membre du Cercle des économistes. Actuellement, il dirige l'équipe énergie-climat du LEDA, qui anime plusieurs chaires de recherche (économie du climat, économie du gaz, marchés européens de l'électricité) et un master (énergie-finance-carbone). Auparavant, il a notamment siégé au conseil mondial de l'International Association for Energy Economics, et en tant qu'expert auprès de la Convention citoyenne pour le climat. Il est coéditeur de la revue *Economics and Policy of Energy and the Environment* et membre du comité de rédaction de l'*International Journal of Management and Network Economics*.

→ *L'intégration des équipements numériques dans les systèmes électriques : quelques enjeux de politique publique pour l'Europe*

Yassine LEFOUILI est maître de conférences à la Toulouse School of Economics, qu'il a rejoint après un doctorat à l'Université Paris-1 Panthéon-Sorbonne et un post-doctorat à l'Université catholique de Louvain. Ses principaux champs de recherche sont l'économie industrielle, la politique de la concurrence, l'économie numérique et l'analyse économique du droit de la propriété intellectuelle. Ses articles de recherche ont été publiés dans des revues telles que le *RAND Journal of Economics*, *Games and Economic Behavior*, *European Economic Review*, *Journal of Industrial Economics*, *International Journal of Industrial Organization* et *Journal of Economics and Management Strategy*. Il est actuellement éditeur associé de l'*International Journal of Industrial Organization*, directeur du programme TSE Executive Education et responsable du master 2 d'économie et droit de la concurrence à TSE.

→ *Green energy pricing for digital Europe*

Marc MOREAU est ingénieur diplômé de l'École polytechnique et de l'ENSTA.

Il a fait des usages du numérique le fil directeur de sa carrière. Après avoir débuté au sein de l'administration, et notamment à la Délégation générale pour l'armement où il a été directeur de

programme, il rejoint le secteur privé en 2008 en ciblant les services urbains.

Chez Veolia Recherche et Innovation, il dirige et développe le département Modélisation et Technologies de l'Information pour apporter le meilleur du numérique au service de l'eau, de la propreté et de l'énergie. Il joue notamment un rôle déterminant dans la construction de l'offre *smart water* de Veolia et la mise en place d'une démarche *data* à la R&D.

Attiré par la révolution digitale dans la mobilité, il rejoint Transdev en tant que responsable des systèmes numériques et du transport intelligent avant de devenir directeur client voyageur pour la France. Il contribue fortement à la stratégie groupe en matière de *Mobility as a Service*, redéfinit la stratégie de distribution et de paiement, et rénove la démarche de connaissance client.

Fin 2020, il crée Ville et Mobilité de Demain pour apporter son expertise au développement de services numériques pour la ville et les territoires.

→ **Le numérique, facteur de succès de la mobilité électrique**

Michel MORVAN a occupé les fonctions de directeur scientifique et de directeur de la veille et de l'innovation dans le groupe Veolia de janvier 2009 à février 2013, avant de prendre la présidence de Cosmo Tech. Il a également été professeur d'informatique à l'École normale supérieure de Lyon, directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales à Paris (chaire de Modélisation des systèmes complexes) et *external professor* au Santa Fe Institute (New Mexico, USA). Il est également fondateur et ancien directeur de IXXI (Institut rhônalpin des systèmes complexes) et ancien membre de l'Institut universitaire de France. Il préside actuellement l'Institut de recherche technologique SystemX et est membre du réseau d'experts en intelligence artificielle de l'OCDE (ONE AI, OECD Network of Experts on AI). Il est Eisenhower Fellow.

→ **Les enjeux technologiques et industriels du numérique dans les réseaux électriques**

Vincent NIEBEL, ingénieur général des mines, diplômé de l'École polytechnique et de Télécom Paris, est directeur des systèmes d'information du groupe EDF.

Il a débuté sa carrière en 2000 au ministère de l'Intérieur, comme responsable de programmes informatiques et télécommunications présentant des enjeux technologiques et de conduite du changement importants. Il a ensuite évolué dans différentes fonctions au sein de la direction des systèmes d'information et de communication de ce même ministère (télécommunication, pilotage de SI, gouvernance). En 2009, il devient directeur des systèmes d'information de la préfecture de police de Paris et y déploie un important programme de transformation numérique.

Fin 2013, il retourne au ministère de l'Intérieur pour construire et diriger la gouvernance ministérielle des systèmes d'information et de communication. Il est nommé directeur des systèmes d'information et de communication en 2017, direction devenant la direction du numérique en 2020, après avoir mené une importante réforme pour accélérer la transformation numérique du ministère.

Il rejoint le groupe EDF en septembre 2020, pour poursuivre son action numérique et informatique dans un domaine en pleine transformation, au cœur du service au public : l'énergie.

→ **Coévolution des systèmes électriques et informatiques du Groupe EDF depuis vingt ans**

Bertrand PAILHÈS est directeur des technologies et de l'innovation de la CNIL. Diplômé de Télécom Paris et de Sciences Po Paris, et ingénieur des mines, il a travaillé précédemment à l'ARCEP et à la CNIL avant de rejoindre, en 2013, le cabinet de la ministre déléguée à l'Économie numérique, Fleur Pellerin.

En 2015, il est nommé directeur de cabinet d'Axelle Lemaire, secrétaire d'État au Numérique et a notamment travaillé à l'adoption de la loi pour une République numérique en octobre 2016. Il fut par la suite coordonnateur national de la stratégie pour l'intelligence artificielle.

→ **L'utilisation de l'IA dans la gestion de la crise sanitaire**

Jacques PERCEBOIS est professeur émérite à l'Université de Montpellier, chercheur à l'UMR CNRS Art-Dev. Il est agrégé des facultés d'économie, docteur d'État en économie et diplômé de l'Institut d'études politiques. Il est le fondateur du CREDEN et d'un master en économie de l'énergie qu'il a longtemps dirigé. Il est doyen honoraire de la Faculté d'économie de Montpellier. Il enseigne également à l'École des mines de Paris (mastère OSE) et à l'IFPEN. Il a été membre du conseil scientifique de Gaz de France et du Conseil d'administration de GRTgaz. Il est aujourd'hui membre du conseil scientifique de Framatome. Il a été membre des deux Commissions CHAMPSAUR et a présidé, avec Claude MANDIL, la Commission « Énergies 2050 », qui a rendu en 2012 un rapport au gouvernement sur les perspectives du nucléaire. Il a assuré de nombreuses missions d'expertise et de formation pour divers organismes (Banque mondiale, Commission européenne, Andra, etc.), et il est l'auteur de nombreux articles et de plusieurs ouvrages. On peut citer *Énergie : économie et politiques* (De Boeck Supérieur, 3e édition, novembre 2019, 782 p.), écrit avec Jean-Pierre HANSEN, et plus récemment l'ouvrage *L'énergie racontée à travers quelques destins tragiques* (Éditions Campus ouvert, novembre 2020, 214 p.).

→ **Le numérique au service de la modernisation des réseaux d'électricité**

Yannick PEREZ is the Armand Peugeot chairholder at CentraleSupélec. For the last 20 years, Yannick Perez has published more than 80 articles and book chapters in mobility- and energy-related topics, including contributions in *Energy Policy*, *Ecological Economics* and *Renewable and Sustainable Energy Review*... He has conducted research for a number of industrial companies: EDF, Areva, Gaz de France, PSA, l'Agence nationale de régulation de l'énergie (ANARE) de Côte d'Ivoire, Verbund and Edison.

→ **Integration of electromobility with the electric power systems: The key challenges**

Jean-Christophe POUDOU a obtenu le doctorat ès sciences économiques de l'Université de Montpellier en 1996. Il est aujourd'hui professeur à l'Université de Montpellier et membre du laboratoire de recherche Montpellier Recherche en économie. Ses principaux champs de recherche sont l'économie industrielle, l'économie de l'énergie, l'économie de la R&D et l'innovation. Plus récemment, il s'intéresse à l'analyse de la réglementation tarifaire d'accès aux réseaux de distribution électrique pour les *prosumers* ainsi qu'à l'analyse des plateformes d'échange d'électricité pair-à-pair en pilotant le projet POTEM appuyé par Montpellier Université d'excellence. Ses articles de recherche ont été publiés dans des revues comme *Journal of Industrial Economics*, *International Journal of Industrial Organization*, *The Energy Journal*, *Energy Economics*.

→ **Les plateformes numériques d'échange d'électricité**

Annabelle RONDAUD est diplômée d'une grande école de communication (CELSA, Sorbonne, Paris), où elle a obtenu un doctorat de sciences de l'information et de la communication en 2011. Elle a également un master 1 en droit privé et un mastère en management des entreprises culturelles (Burgundy School of Business).

Elle a exercé pendant dix ans en tant que responsable de la communication au sein d'institutions culturelles et d'entreprises. À l'issue de cette expérience, elle s'est orientée vers les partenariats nationaux et internationaux au sein de la direction de la recherche fondamentale du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), puis vers les partenariats européens dans le domaine des énergies bas carbone au sein de la direction des affaires européennes du CEA. Durant cette expérience, elle fut également coordinatrice du Point de contact national (PCN) français Énergie et coordinatrice du Groupe de travail Europe/International de l'Alliance française dédiée aux énergies (ANCRE).

Depuis juin 2020, elle a rejoint le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation en tant que représentante au comité de programme Horizon Europe pour le *cluster 5* « climat, énergie, mobilité ».

→ **Le cluster 5 d'Horizon Europe au cœur des problématiques des systèmes énergétiques**

Aurélien TANIÈRE est issu d'un parcours universitaire, en informatique, puis en micro-électronique et enfin en management par projets. Il a évolué durant neuf ans sur le secteur du conseil en financement et en gestion de l'innovation. Il a aidé des entreprises, de la *start-up* au grand groupe, à structurer et à financer leurs projets de RDI (Recherche, Développement et Innovation). Très curieux et intéressé par l'entrepreneuriat, il a créé sa société de conseil spécialisée sur l'accompagnement de *start-up* IT sur ces sujets de financement et de gestion de l'innovation. En 2017, il rejoint OVHcloud sur un poste de chef de projet innovation avec, pour première mission, de valoriser la R&D en interne et à l'externe.

Sa mission est de faciliter la collaboration entre OVHcloud et le monde de la recherche académique. Cela se traduit par la mise en place de partenariats entre des instituts de recherche, des écoles, des universités, entre autres, qui peuvent prendre la forme de thèses CIFRE, de projets collaboratifs ou encore d'intégration de technologies issues du monde de la recherche. La finalité est de créer des liens de confiance et de permettre un transfert de connaissances issues de la recherche publique vers un industriel, OVHcloud.

→ **L'optimisation de la consommation électrique d'un cloud provider**

Félicien VALLET est ingénieur au Service de l'expertise technologique de la CNIL. Ingénieur et docteur de Télécom Paris, il a précédemment travaillé en tant qu'ingénieur R&D à l'Institut national de l'audiovisuel. Spécialisé dans le traitement automatique des signaux de parole, l'analyse et l'indexation de contenus multimédia et l'extraction automatique d'information, il rejoint la CNIL en 2015 et explore les enjeux de vie privée dans les sujets relatifs à l'intelligence artificielle.

→ **L'utilisation de l'IA dans la gestion de la crise sanitaire**

Felix von PECHMANN est ingénieur des mines et docteur de l'École polytechnique. Sa thèse de doctorat est intitulée *L'ingénierie du déploiement d'une plateforme disruptive - Le cas du véhicule électrique*. Actuellement directeur du programme information voyageurs à la Régie autonome des transports parisiens (RATP), il y était précédemment responsable du programme bus électriques. Ses domaines de recherche et d'expertise incluent la mobilité partagée et électrique, la transformation numérique et le déploiement de systèmes complexes.

Après des expériences dans la Silicon Valley, à Chicago et à Hong Kong, il a travaillé plusieurs années pour Renault. Après un an en usine à Douai sur un projet de système d'information, il a travaillé sur des projets de mobilité partagée et de taxis électriques, et sur le déploiement des véhicules électriques.

Il a mené ses recherches dans le domaine du management et du marketing et de la diffusion des innovations, de la conception de nouveaux produits et de l'économie des transports. Pendant son doctorat, il a enseigné dans plusieurs grandes écoles et à l'université. Ses dernières publications sont : « Disruption systémique et management de programme ambidextre : le cas des bus électriques » (avec Christophe Midler), *Gérer & comprendre*, n°138, décembre, pp. 3-19, 2019 ; « Comment prévoir le succès d'une innovation de rupture ? Le cas du véhicule électrique » (avec Cécile Chamaret, Béatrice Parguel et Christophe Midler), *Décisions Marketing*, 81, pp. 81-98, 2016 ; "Managing systemic and disruptive innovation: Lessons from the Renault Zero Emission Initiative" (avec Christophe Midler, Rémi Maniak et Florence Charue-Duboc), *Industrial and Corporate Change*, 24(3), pp. 677-695, 2015.

→ **La transition vers l'électrique pour des milliers de bus à la RATP : la puissance du numérique au service d'un projet titanesque**