

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

Par Nadia MAÏZI

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

Edi ASSOUMOU

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

et Thomas LE GALLIC

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

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

2072, le rendez-vous

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La matérialité énergétique de la « *Digital Society* »

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Bibliographie

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