

**Commission économique pour l'Europe****Comité de l'énergie durable****Groupe d'experts de l'efficacité
énergétique****Neuvième session**

Genève, 3 et 4 octobre 2022

Point 8 de l'ordre du jour provisoire

**Libérer le potentiel d'efficacité énergétique
en s'appuyant sur la transition numérique****Groupe d'experts des systèmes de production
moins polluante d'électricité****Dix-huitième session**

Genève, 19 et 20 septembre 2022

Point 7 de l'ordre du jour provisoire

**Table ronde sur l'utilisation du numérique
dans les systèmes électriques****Transition numérique : accélérer la transformation des
systèmes électriques. Document élaboré conjointement
par l'Équipe spéciale de la transition numérique
dans le domaine de l'énergie du Groupe d'experts
de l'efficacité énergétique et le Groupe d'experts
des systèmes de production moins polluante d'électricité****Note du secrétariat***Résumé*

Les solutions numériques facilitent les progrès en matière de connectivité, de données et d'analyse et peuvent améliorer considérablement l'efficacité globale du système énergétique et, ainsi, promouvoir la réalisation des objectifs de développement durable. Grâce à l'innovation numérique, nous disposons de nouveaux moyens d'aborder les défis de la chaîne globale de fourniture d'énergie, en plus de ceux liés spécifiquement à l'efficacité énergétique, et de les surmonter de manière inédite.

Le présent document a été élaboré en application des plans de travail pour 2022-2023 du Groupe d'experts de l'efficacité énergétique (ECE/ENERGY/2021/10) et du Groupe d'experts des systèmes de production moins polluante d'électricité (ECE/ENERGY/2021/8), aux termes desquels les deux groupes d'experts sont chargés d'étudier conjointement les possibilités offertes par le passage au numérique des systèmes électriques, ainsi que ses éventuelles incidences indirectes, en mettant l'accent sur l'efficacité des systèmes, les modèles économiques innovants ainsi que l'efficacité de l'élaboration et de la mise en œuvre des politiques. Ces travaux ont été menés par l'Équipe spéciale de la transition numérique dans le domaine de l'énergie, qui relève du Groupe d'experts de l'efficacité énergétique et offre un cadre aux organes subsidiaires du Comité de l'énergie durable pour mener les recherches nécessaires et évaluer les possibilités et les difficultés liées à la transition numérique dans chaque secteur.



Les auteurs du présent document examinent les possibilités et les avantages offerts par l'utilisation du numérique dans les systèmes électriques, recensent les parties prenantes et mettent en évidence les défis que les autorités publiques, les acteurs du secteur privé et les utilisateurs finaux devront prendre en considération. On trouvera en conclusion des recommandations relatives aux politiques qui permettraient d'accélérer la transformation des systèmes électriques grâce au numérique pour en accroître l'efficacité tout en garantissant leur sécurité et leur durabilité. On trouvera également dans le présent document les résultats d'une enquête effectuée auprès d'experts du domaine pour recueillir leur avis sur les difficultés que pose la transition numérique des systèmes énergétiques et les perspectives qu'elle offre dans différentes régions du monde.

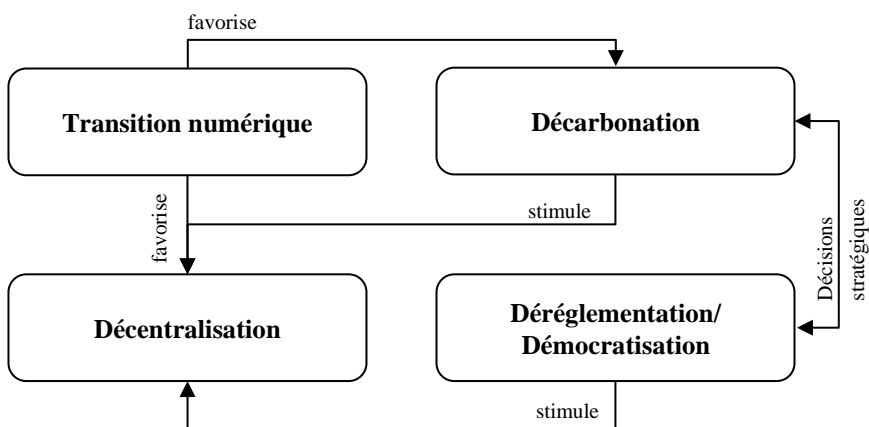
I. Considérations relatives à la transition numérique des systèmes électriques : point de vue de l'offre

1. À l'échelle mondiale, la part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie est passée de 15 % à 20 % depuis l'an 2000. D'ici à 2040, elle devrait passer à 24 % si les pays maintiennent leur cap actuel, et pourrait atteindre 31 % s'ils optent pour l'électrification de tout un éventail d'applications¹.² Les technologies numériques, qui permettent de coordonner, d'analyser et d'interpréter des quantités toujours plus grandes de données sur les systèmes énergétiques, sur les préférences des utilisateurs et sur les exigences des systèmes, peuvent faciliter l'optimisation complexe au niveau des systèmes que nécessite une énergie décentralisée, et seront la clef de voûte du passage à l'électrique dans de nombreux secteurs. S'agissant des systèmes énergétiques électrifiés, le passage au numérique garantira des avantages nets globaux pour les systèmes et leurs bénéficiaires et permettra de progresser vers une amélioration constante de l'efficacité énergétique.

2. La transition numérique joue un rôle de plus en plus essentiel dans les politiques énergétiques, qui peut être résumé à l'aide d'un cadre en quatre axes (voir fig. I) : transition numérique, décentralisation, déréglementation/démocratisation et décarbonation.

Figure I

Le rôle de la transition numérique dans le secteur de l'énergie, en 4 axes



¹ Agence internationale de l'énergie, « World Energy Outlook 2019 », extrait de rapport sur l'électricité, disponible (en anglais uniquement) à l'adresse suivante : <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/electricity> (consulté le 3 mai 2022).

² Agence internationale de l'énergie, « Power Systems in Transition », extrait du rapport « Electricity security matters more than ever », disponible (en anglais uniquement) à l'adresse suivante : <https://www.iea.org/reports/power-systems-in-transition/electricity-security-matters-more-than-ever> (consulté le 3 mai 2022).

3. La réduction de l’empreinte carbone du secteur de l’énergie et des effets sur l’environnement de la production, du transport et de l’utilisation de l’énergie passe en partie par des politiques favorisant la production décentralisée à partir de sources d’énergie renouvelables, ainsi que par des efforts de déréglementation et de dégroupage. Cela aboutit bien souvent à une dissociation des sources d’approvisionnement et de production d’énergie, dans l’espace et dans le temps. Les technologies numériques, qui permettent de coordonner, d’analyser et d’interpréter des quantités toujours plus grandes de données sur les systèmes énergétiques, sur les préférences des utilisateurs et sur les exigences des systèmes, peuvent faciliter l’optimisation complexe au niveau des systèmes que nécessite un secteur énergétique décentralisé. Les données et leur utilisation efficace seront par exemple essentielles pour affiner les prévisions relatives aux ressources énergétiques variables (l’éolien, le solaire, etc.). De nouvelles solutions technologiques peuvent également contribuer à optimiser le stockage de ces ressources énergétiques afin d’assurer la continuité de l’alimentation en énergie en cas de phénomène météorologique extrême, comme une vague de chaleur, ou un incendie de forêt. Le passage au numérique permet d’automatiser davantage les processus et l’utilisation des ressources et de les rendre plus transparents, et ainsi de mettre en évidence les cas de mauvaise utilisation et d’y remédier, ce qui favorise aussi la réduction de l’empreinte carbone du secteur de l’énergie.

4. Pour exploiter pleinement le potentiel du numérique dans le secteur de l’énergie, il faut pouvoir s’appuyer sur une infrastructure informatique solide et pleinement opérationnelle, ainsi que sur des réseaux mobiles et fixes offrant une bonne couverture. Les difficultés que pose la transition numérique quant à la demande d’électricité et aux autres ressources nécessaires, à la confidentialité des données, à la cybersécurité ou encore à la complexité des décisions automatisées demeurent non résolues, et il importe de trouver des solutions immédiates et viables à long terme^{3, 4}. En outre, le passage au numérique exige que des contrôles rigoureux soient effectués dès la phase de planification afin de garantir un niveau élevé de cybersécurité et de réduire les vulnérabilités.

II. Acteurs de la transition numérique dans les systèmes électriques

5. Le passage au numérique des systèmes électriques est un processus complexe qui se caractérise par de multiples interdépendances entre des organisations internationales et des acteurs des secteurs public et privé et de la société civile. Les parties prenantes à ce processus appartiennent généralement à l’une des quatre grandes catégories suivantes :

a) Organisations gouvernementales internationales, autorités locales et nationales et organisations internationales ;

b) Organisations non gouvernementales (ONG) nationales et internationales engagées en faveur de l’inclusion sociale, du renforcement des compétences numériques, de la transparence et de la lutte contre la corruption ou encore de la responsabilisation des acteurs du marché ;

c) Compagnies d’électricité et entreprises de l’économie numérique de tous types, du local à l’international ;

³ Agence internationale de l’énergie, « Digitalization & Energy », disponible (en anglais uniquement) à l’adresse suivante : <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf> (consulté le 3 mai 2022).

⁴ Conseil consultatif allemand sur le changement global, « Flagship Report. Towards Our Common Digital Future », disponible (en anglais uniquement) à l’adresse suivante : https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2019/pdf/wbgu_hg2019_en.pdf (consulté le 3 mai 2022).

d) Consommateurs et prosommateurs ou collectifs d'utilisateurs (y compris à l'échelle locale)^{5, 6}.

6. On trouvera dans le tableau 1 un récapitulatif des différentes parties prenantes et des principales raisons qui les motivent à promouvoir la transformation numérique, ainsi que des exemples qui illustrent de manière concrète la systématisation dont il est question plus haut.

Tableau 1

Parties prenantes à la transition numérique dans le contexte du secteur de l'énergie

<i>Partie prenante</i>	<i>Principaux objectifs</i>	<i>Exemple⁷</i>
Organisations internationales, organismes gouvernementaux	Neutralité, égalité et équité de l'offre de solutions numériques dans le monde entier ; protection des consommateurs et des entreprises ; formulation, prise en compte et protection des intérêts communs des membres de ces organisations ; alignement des cadres nationaux sur le consensus international (y compris s'agissant de la normalisation et de l'interopérabilité) ; formation d'un consensus.	Le Forum sur la gouvernance d'Internet, un forum multipartite qui tient des réunions annuelles sur la réglementation d'Internet.
Autorités nationales et régionales	Protection des intérêts nationaux ou régionaux majeurs ; sécurité nationale ; protection des consommateurs et des entreprises ; harmonisation des cadres internationaux et des projets nationaux.	Au Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, le Gouvernement et l'autorité de régulation de l'énergie ont mis en place une stratégie nationale de transition numérique du secteur de l'énergie, dans le cadre de laquelle un projet cohérent et une série de mesures visant à passer au numérique dans les systèmes énergétiques ont été établis.
ONG internationales, nationales et régionales	Formulation, prise en compte et protection des intérêts communs aux bénéficiaires ; formation d'un consensus.	AlgorithmWatch, une organisation helvético-allemande à but non lucratif spécialisée dans les activités de recherche et de sensibilisation, surveille et analyse dans le détail les systèmes de prise de décisions automatisés et leur impact sur la société.
Compagnies d'électricité	Maintien de la rentabilité et des revenus ; fiabilité ; qualité du service et satisfaction des consommateurs ; conformité réglementaire.	Iberdrola, un fournisseur d'énergie espagnol, utilise le système MeteoFlow pour prédire les volumes produits par ses dispositifs de production d'énergie renouvelable en analysant les variations météorologiques à l'aide de techniques d'analyse des mégadonnées.

⁵ Les consommateurs actifs d'énergie, souvent appelés « prosommateurs » parce qu'ils sont à la fois producteurs et consommateurs d'électricité, pourraient changer radicalement la donne dans les systèmes électriques. Il existe différents types de prosommateurs : les prosommateurs privés, qui produisent de l'électricité à leur domicile (principalement au moyen de panneaux photovoltaïques installés sur le toit), les coopératives citoyennes de l'énergie ou du logement, les prosommateurs commerciaux dont l'activité principale n'est pas la production d'électricité et les institutions publiques comme les écoles ou les hôpitaux.

⁶ On part du principe que « compagnies d'électricité » et « entreprises de l'économie numérique » regroupent les acteurs les plus impliqués dans le développement d'activités au carrefour des domaines de l'électricité et du numérique.

⁷ La mention d'une entreprise, d'un produit, d'un service ou d'un procédé breveté n'implique aucune approbation ni critique de la part de l'Organisation des Nations Unies. Les appellations employées ne reflètent en aucun cas une quelconque prise de position du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies quant au statut juridique de pays, territoires, villes ou zones quelconques, ou de leurs autorités.

<i>Partie prenante</i>	<i>Principaux objectifs</i>	<i>Exemple⁷</i>
Entreprises de l'économie numérique	Rentabilité et génération de revenus ; développement de produits ; fiabilité ; qualité du service et satisfaction des consommateurs ; conformité réglementaire.	Google, qui possède l'un des plus grands parcs de centres de données, prévoit de décarboner son approvisionnement en électricité d'ici à 2030 et de fonctionner intégralement grâce à une énergie sans carbone et peu coûteuse.

7. Les groupes de parties prenantes dont il est question ci-dessus exercent généralement une influence sur d'autres organisations homologues au sein de la même catégorie de parties prenantes (influence horizontale) ou sur des organisations d'autres catégories (influence verticale). Compte tenu du fait que l'élaboration des politiques est un processus complexe, qui va au-delà des simples représentations schématisées, les influences verticales et horizontales peuvent s'exercer simultanément et s'affaiblir ou se renforcer mutuellement, notamment dans le monde multilatéral qui est le nôtre.

III. Possibilités et avantages offerts par la transformation numérique des systèmes électriques

8. Les technologies numériques offrent un éventail d'avantages aux consommateurs d'électricité, aux producteurs, aux fournisseurs d'énergie, aux gestionnaires de réseaux et au système dans son ensemble : une meilleure efficacité, des économies, une plus grande fiabilité, une meilleure résilience du système énergétique, la sécurité énergétique, etc. Elles promeuvent par ailleurs une transition accélérée vers des énergies propres. Les appareils connectés via l'Internet des objets, ainsi que les possibilités offertes par les applications de la science des données, telles que l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, la chaîne de blocs et d'autres technologies, peuvent permettre de trouver de nouveaux moyens de répondre à une demande plus importante, de mettre en place des solutions innovantes pour gérer une variabilité et une incertitude accrues sur les réseaux, d'améliorer l'efficacité énergétique et d'augmenter la part d'énergies renouvelables variables de manière rentable, fiable, résiliente et sûre⁸.

9. L'obtention de mesures en temps réel rendues possibles par le passage au numérique permettrait d'améliorer sensiblement l'efficacité des systèmes électriques dans leur ensemble, ce qui pourrait à terme favoriser un meilleur fonctionnement des réseaux. Ces améliorations pourraient prendre les formes suivantes :

a) La prise de décisions s'appuierait sur des données en temps réel plutôt que sur des modèles statiques. Il serait notamment possible d'utiliser ces données pour améliorer la prise de décisions par les opérateurs, la perception des situations, la gestion des actifs et l'analyse des études de fiabilité ;

b) On pourrait optimiser et agréger les flux énergétiques grâce à un équilibrage de la charge et des contrôles réseau en temps réel encore plus intelligents, rendus possibles par des dispositifs connectés et des capacités de surveillance perfectionnées, d'une part, et par la mise en place d'une grille tarifaire dynamique d'autre part, ce qui permettrait de mobiliser à tout moment les sources les plus économiques et durables pour répondre à la demande⁹ ;

⁸ Agence internationale de l'énergie, « Power Systems in Transition », extrait du rapport « Cyber resilience », disponible (en anglais uniquement) à l'adresse suivante : <https://www.iea.org/reports/power-systems-in-transition/cyber-resilience> (consulté le 10 mai 2022).

⁹ Forum économique mondial, « The electricity industry: uncovering value through digital transformation », disponible (en anglais uniquement) à l'adresse suivante : <http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/dti-electricity-industry-slideshare.pdf>.

c) La flexibilité accrue des réseaux permettrait de gérer la variabilité et l'incertitude grâce à un meilleur accès aux différentes ressources (en particulier du côté de la demande). Grâce aux capacités flexibles des véhicules électriques et à la connectabilité Internet de nombreux équipements électriques et électroniques sur le terrain, il serait possible de soulager les réseaux pendant les périodes de tension, où le risque de coupure est élevé ;

d) La télésurveillance :

i) Des actifs réseau, qui fourniraient aux opérateurs une meilleure connaissance de l'état des actifs, à la fois en temps réel et tout au long de leur cycle de vie, ce qui permettrait de les exploiter au mieux. Grâce au niveau d'information accru, le fonctionnement et les capacités des réseaux seraient optimisés, ce qui améliorerait la gestion des flux d'énergie, réduirait les taux de perte, etc. Cela conduirait, à terme, à une exploitation plus fiable et plus durable des réseaux ;

ii) Des actifs réseau et des actifs technologiques ; couplée à la maintenance et à l'exploitation à distance, cette double télésurveillance permettrait de mieux maîtriser l'ensemble de la chaîne, de déterminer plus facilement la cause d'une panne et d'intervenir plus rapidement, ce qui réduirait la durée des pannes. La disponibilité et le partage des données pourraient également améliorer la visibilité et la connaissance du réseau concerné et des réseaux environnants, ce qui permettrait aux gestionnaires réseau de mieux éviter les effets dominos. Une telle télésurveillance permettrait également de réduire les investissements futurs, car les actifs actuels seraient utilisés jusqu'à ce que leurs limites techniques soient atteintes (réduction des marges) ;

e) Les fournisseurs d'énergie pourraient recevoir les données de consommation des clients en temps réel, et ces derniers recevraient des signaux-prix des informations actualisées sur les tarifs, ce qui pourrait aboutir à une tarification de l'énergie en direct. Il serait simple d'établir des marchés locaux de l'énergie et, ainsi, d'accroître la consommation locale d'énergie produite localement, de réduire la dépendance à l'égard des réseaux tout en offrant davantage de choix aux particuliers et en encourageant l'investissement individuel dans les ressources énergétiques décentralisées, s'agissant notamment du stockage¹⁰. Cela promouvrait également une perspective de consommateur, selon laquelle un client informé et compétent pourrait prendre des décisions quant à son raccordement aux services et à l'assistance réseau en s'appuyant sur les outils connectés et l'analyse des données auxquelles il a accès.

10. Les ressources énergétiques décentralisées et autres ressources non traditionnelles continuant de remplacer les ressources traditionnelles du secteur, le bouquet énergétique et les caractéristiques opérationnelles des systèmes vont être amenés à évoluer. L'utilisation de ressources énergétiques décentralisées nécessitera des changements dans la manière de planifier et d'exploiter les systèmes, ce qui exigera une visibilité accrue du système de distribution et une meilleure coordination des activités de transport et de distribution.

11. L'évolution du paysage énergétique est marquée par l'intégration difficile des sources d'énergie renouvelable dont la production est variable et par la part croissante de ressources décentralisées dans le mix énergétique. Ces deux tendances nécessitent de modifier la façon dont les systèmes sont organisés et exploités, notamment en utilisant les ressources décentralisées comme variable d'ajustement. Il faudra également changer d'outils et de modèles. Les innovations numériques peuvent contribuer à garantir la précision et la validité des outils de modélisation et d'étude face aux incertitudes actuelles.

¹⁰ Les ressources énergétiques décentralisées sont des ressources non synchrones (elles nécessitent l'emploi d'onduleurs), définies au sens large comme des ressources situées à proximité de leurs consommateurs, qui peuvent répondre à tout ou partie des besoins immédiats de ces derniers en électricité et qui peuvent également être utilisées par le système, soit pour réduire la demande (efficacité énergétique), soit pour contribuer à répondre aux besoins en énergie, en capacité ou en services auxiliaires du réseau de distribution. Ces ressources, si elles fournissent de l'électricité ou de l'énergie thermique, sont peu importantes, connectées au système de distribution et proches de la charge. Parmi les différents types de ressources énergétiques décentralisées, on peut citer l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne, la production combinée de chaleur et d'électricité, l'énergie stockée, la fourniture à la demande, les véhicules électriques, les mini-réseaux et l'efficacité énergétique.

12. Du point de vue de la planification du transport et de l'analyse des systèmes énergétiques, l'impact des ressources énergétiques décentralisées sur les réseaux de transport (BPS¹¹, pour *bulk power system*) se résume à deux aspects principaux¹² :

a) La modélisation : faire apparaître les ressources décentralisées agrégées dans les études de fiabilité des réseaux de transport, améliorer les capacités et les connaissances du secteur en matière de représentation des ressources décentralisées, et élaborer des ensembles de données solides et cohérents pour simuler les flux énergétiques et leur dynamique ;

b) Les études : améliorer les techniques, les modèles et les méthodes afin de garantir que les études de fiabilité des réseaux de transport sont effectuées dans les conditions d'exploitation les plus tendues, recenser les principales conditions d'exploitation et les études de sensibilité à mener impérativement, améliorer les outils logiciels et les capacités d'étude, y compris grâce à l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, en vue de mettre au point des algorithmes qui tiennent compte des conditions météorologiques et d'autres conditions environnementales, et intégrer d'autres données pour améliorer les résultats et optimiser le rôle des actifs énergétiques dans le cadre d'un système plus global.

13. En offrant une plus grande souplesse dans la planification et la conception des réseaux, la transition numérique permettra de mettre en place davantage de solutions « non câblées », c'est-à-dire des solutions de transport et de distribution non traditionnelles telles que les ressources énergétiques décentralisées ou des solutions reposant sur l'efficacité énergétique et la fourniture à la demande, ainsi que des logiciels et des contrôles réseau qui reporteront ou supprimeront la nécessité de mettre à niveau certains matériels (lignes, transformateurs, etc.) en réduisant la charge au niveau des sous-stations ou des circuits¹³.

14. Le réseau numérique concourt à la mise en place d'un écosystème plus large et aux racines plus profondes, qui inclut notamment les bâtiments intelligents, la recharge intelligente des véhicules électriques, les services véhicule-to-grid (réinjection dans le réseau de l'énergie stockée par les batteries), les prosummateurs et l'analyse en bordure de réseau.

15. Outre une exploitation et une planification plus optimales du réseau, le passage au numérique fournira des ensembles de données dynamiques qui favoriseront la mise en place de réseaux plus souples et plus résilients. Les autres avantages associés à la disponibilité de ces données et aux analyses qui en seront faites peuvent être divisés en deux grandes catégories :

a) Les avantages liés aux actifs, aux outils et aux technologies, c'est-à-dire les avantages opérationnels et commerciaux qui facilitent l'exploitation du réseau, la gestion des actifs et l'approvisionnement en produits énergétiques, qui concerneront notamment les domaines suivants :

i) La gestion des actifs d'entreprise : l'infrastructure physique d'une compagnie d'électricité est conçue pour préserver et protéger ses actifs. Lorsque ces actifs matériels deviennent numériques, il est possible de les surveiller et de les contrôler de manière à optimiser leur rendement et leur gestion, à les rendre plus efficaces et à gagner en flexibilité pour renforcer la résilience. Les entreprises de services publics de distribution doivent sortir des modèles traditionnels de gestion des actifs et s'orienter vers des stratégies numériques globales articulées autour d'une

¹¹ Le BPS ou réseau de transport comprend les installations et les systèmes de contrôle nécessaires à l'exploitation d'un réseau de transport d'énergie électrique interconnecté (ou toute partie de celui-ci), ainsi que le courant électrique provenant des installations de production nécessaires au maintien d'un réseau de distribution fiable. Cette notion ne recouvre pas les installations utilisées pour la distribution d'électricité à l'échelle locale.

¹² North American Electric Reliability Corporation, Synthèse des activités, « BPS-Connected Inverter-Based Resources and Distributed Energy Resources », disponible (en anglais uniquement) à l'adresse suivante : https://www.nerc.com/comm/PC/Documents/Summary_of_Activities_BPS-Connected_IBR_and_DER.pdf.

¹³ Utility Dive, « Non-Wires Alternatives: What's up next in utility business model evolution », disponible (en anglais uniquement) à l'adresse suivante : <https://www.utilitydive.com/news/non-wires-alternatives-whats-up-next-in-utility-business-model-evolution/446933/>.

gouvernance des données et d'une cybersécurité solides. Le marché connaît des transformations, parmi lesquelles l'apparition des centrales électriques virtuelles et une concurrence accrue entre les fournisseurs d'énergie. La disponibilité de données plus dynamiques, combinée à des analyses avancées, permettra une gestion plus optimale des actifs, qui rendra possible une maintenance prédictive, par opposition à la maintenance systématique et conditionnelle traditionnelle, et une prolongation de leur durée de vie en fonction de leur usure réelle, au lieu de leur remplacement systématique ;

ii) Les prévisions de la demande et des conditions météorologiques : la nouvelle donne du marché (initiatives en faveur de la transition énergétique, évolution de la demande due à l'essor du télétravail et à des phénomènes naturels extrêmes, etc.) a perturbé les capacités des opérateurs de services publics d'électricité et des gestionnaires de réseaux à prévoir la demande et, partant, rendu la consommation d'électricité plus difficile à prévoir. Aujourd'hui plus que jamais, des investissements avisés dans des actifs décentralisés et gérés à distance (les compteurs intelligents, par exemple) sont nécessaires pour que les systèmes gagnent en rentabilité et en efficacité. Les activités de recherche sur les prévisions, fondées notamment sur l'intelligence artificielle et les mégadonnées, seront également essentielles ;

iii) L'exploration de nouvelles technologies : les mini-réseaux et les systèmes de contrôle décentralisés, les outils et techniques d'analyse de pointe, ainsi que les solutions offertes par le cloud computing, l'intelligence artificielle et la chaîne de blocs, sont quelques-uns des domaines technologiques fondés sur l'utilisation des mégadonnées dans lesquels les gestionnaires de réseaux et les fournisseurs d'énergie devraient envisager d'investir¹⁴ ;

b) Les avantages pour le consommateur : de nos jours, nombre des consommateurs d'énergie sont des enfants du numérique et attendent certaines innovations de la part de leur fournisseur d'énergie, notamment une interface utilisateur personnalisée, des informations sur leur consommation en temps réel et la possibilité de connecter les appareils intelligents qu'ils ont chez eux¹⁵. Grâce aux mégadonnées, les compagnies d'électricité et les fournisseurs d'énergie peuvent obtenir des informations sur le comportement des consommateurs et s'en servir pour améliorer la qualité des services et en savoir davantage sur les besoins de leurs clients, tout en protégeant la confidentialité des données. Les fournisseurs d'énergie peuvent élaborer des stratégies plus intelligentes pour améliorer leurs résultats et stimuler leur chiffre d'affaires. Les possibilités offertes aux consommateurs par le passage au numérique sont de deux ordres :

i) La réduction ou l'élimination des coûts, qui passent par :

- La possibilité d'adapter les capacités de production en période de forte demande ;
- La possibilité d'adapter les capacités de transport et de distribution en période de forte demande ;
- L'adaptation des réseaux aux conditions environnementales (phénomènes météorologiques extrêmes, par exemple) ;
- L'offre de prix variables en fonction de la plage horaire (heures creuses, heures pleines et heures de forte demande) ; il va sans dire que les économies ainsi réalisées varient selon les régions et dépendent des conditions actuelles du marché de l'énergie ;

¹⁴ Voir le document informel GEEE-9/2022/INF.4 intitulé « Challenges of big data and analytics-driven demand-side management » (problèmes posés par les mégadonnées et la gestion de la demande au moyen d'analyses).

¹⁵ Alexei Dingli et Dylan Seychell, « Who Are the Digital Natives? », *The New Digital Natives* (Springer, Berlin, Heidelberg, 2015), disponible (en anglais uniquement) à l'adresse suivante : https://doi.org/10.1007/978-3-662-46590-5_2.

- Des coûts externes des émissions de gaz à effet de serre liés à la variation de la consommation d'énergie à chaque plage horaire (heures creuses, heures pleines et heures de pointe), le cas échéant ;
 - Des relevés et une facturation plus faciles et moins sujets aux erreurs grâce aux compteurs intelligents ;
- ii) La mise en place de stratégies de participation de la clientèle (couvrant également des décisions plus globales quant à leur consommation d'énergie) : le processus de transition du système énergétique vers un mix énergétique plus propre doit être centré sur le consommateur. Les fournisseurs d'énergie doivent tenir compte du fait que le client n'est plus un simple consommateur, mais un « citoyen de l'énergie » qui a un avis sur la question et prend des décisions conscientes en ce qui concerne sa consommation et certains services énergétiques, et construire des programmes conçus pour ce nouveau type de clients :
- Des programmes axés sur les véhicules électriques et l'efficacité énergétique : à mesure que les pays imposent l'utilisation de technologies neutres en carbone et la réduction – et, à terme, l'élimination – des produits d'origine fossile, il importe de mettre en place des campagnes d'éducation ciblées et des actions de sensibilisation afin que les consommateurs adhèrent aux mesures d'incitation prises en ce sens. Cette évolution est rendue possible par le recours aux techniques d'apprentissage automatique et d'analyse, qui facilitent la segmentation de la clientèle, la désagrégation du signal de charge, l'assistance clientèle par téléphone ou via des applications, ainsi que par des investissements dans les infrastructures et des mesures d'incitation prises en parallèle de l'augmentation du coût des combustibles fossiles, par exemple au moyen d'une taxe sur le carbone. La transition numérique peut avoir un impact profond et durable sur le secteur de l'électricité, notamment grâce à des mesures axées sur le consommateur. Les programmes d'efficacité énergétique et d'économies d'énergie peuvent être conçus et mis en œuvre rapidement, et leurs résultats être analysés en peu de temps, notamment par rapport à la création de nouvelles capacités de production, dont la construction et la mise en service peuvent prendre des années ;
 - Des programmes de détection et de diagnostic des pannes : en offrant aux clients un service d'alerte précoce et une estimation précise des délais de rétablissement du courant, les fournisseurs d'électricité renforcent la confiance et améliorent leur niveau de préparation et de réactivité en cas de tempête. Un meilleur accès à de vastes ensembles de données accroît la réactivité et la fiabilité de tous les acteurs de la sûreté publique. Les consommateurs peuvent également contribuer à la bonne gestion du réseau en adaptant leurs comportements ou en utilisant des ressources décentralisées locales. La mise en place de programmes de décentralisation des ressources permettrait de renforcer la capacité à exploiter les mini-réseaux ou la segmentation/l'ilotage intelligents afin d'atténuer, voire d'éliminer, les conséquences des pannes ;
 - Des programmes de tarification dynamique : les gestionnaires de réseau ont accès en direct à leur base de clients et de consommateurs et peuvent ainsi déployer une tarification dynamique à grande échelle et en assurer le suivi, et la combiner à des programmes de gestion d'urgence de la charge, une option particulièrement utile pour les clients qui se trouvent dans une zone où l'énergie coûte très cher. Les gestionnaires de réseau et les fournisseurs d'énergie peuvent élaborer des programmes d'économie d'énergie pour les clients importants tout en réduisant leurs propres risques d'exploitation.

16. En plus de contribuer à faire advenir une électricité plus propre, la transition numérique pourrait offrir les avantages socioéconomiques suivants :

- a) Le passage au numérique dans le secteur de l'électricité pourrait créer de la valeur à hauteur de 1 300 milliards de dollars des États-Unis¹⁶ ;
- b) On estime que le virage numérique (valeur ajoutée et migration des systèmes) pourrait générer 45 % de profits supplémentaires pour le secteur de l'électricité au cours des dix ans à venir¹⁷ ;
- c) En plus de ces bénéfices économiques, la transition numérique permettra aux clients de jouer un rôle plus actif sur le marché de l'énergie et d'influer sur la dynamique des marchés de l'électricité de manière à contribuer à la réalisation d'objectifs environnementaux et sociaux ;
- d) Le passage au numérique des systèmes électriques dynamisera le marché de l'emploi, en faisant évoluer les emplois existants et en en créant de nouveaux. De nouvelles compétences seront nécessaires pour entretenir et gérer les actifs, exploiter les réseaux et réaliser les analyses connexes.

IV. Difficultés liées à la transformation numérique des systèmes électriques

17. Bien que le passage au numérique des systèmes électriques offre de nombreuses possibilités et présente nombre d'avantages, il s'accompagne aussi de difficultés considérables, dont doivent tenir compte les autorités publiques chargées d'encourager l'adoption des technologies, les acteurs du secteur privé responsables de leur déploiement et de leur exploitation, et les clients.

18. Pour s'attaquer aux éventuelles difficultés économiques, sociales ou environnementales découlant de l'adoption de technologies numériques dans les systèmes électriques, il faut connaître la situation de départ des différents réseaux électriques et savoir à quel rythme on peut espérer mener cette transformation. De nombreuses entreprises de services publics de distribution utilisent du matériel et des logiciels obsolètes, notamment des systèmes de gestion de données reposant sur différentes architectures logicielles. Toutefois, comme le niveau d'intégration des données entre les différents matériels et logiciels utilisés par les systèmes énergétiques est souvent faible, voire inexistant, les anciens systèmes ne peuvent généralement pas communiquer avec les nouvelles plateformes. Dans le même temps, les investissements réalisés dans la transformation numérique sont principalement consacrés à l'acquisition de nouveaux systèmes et technologies, et non à la mise à niveau des anciens systèmes¹⁸. Par conséquent, si certains pays ont la capacité économique d'accélérer le processus de transformation numérique, d'autres peuvent se heurter à des problèmes de coût et de logistique, qui ralentissent la transformation en profondeur de leurs systèmes. Par conséquent, il est essentiel d'évaluer en permanence les avantages et les coûts du passage au numérique des systèmes électriques si l'on veut adopter une approche équitable des effets distributifs potentiels des technologies numériques.

19. Dans la mesure où les politiques climatiques orientent souvent la consommation d'énergie vers l'électricité, on peut s'attendre à une augmentation importante de la demande de cette ressource. En outre, la dépendance de la société à l'égard de l'électricité va s'accroître, ce qui renchérra beaucoup le coût des défaillances du réseau électrique. Il convient donc de mesurer et de gérer de manière plus détaillée les ressources d'énergie électrique et les taux d'utilisation de chaque actif, ce que permet l'écosystème du numérique.

¹⁶ Forum économique mondial, « The electricity industry: uncovering value through digital transformation », disponible (en anglais uniquement) à l'adresse suivante : <http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/dti-electricity-industry-slideshare.pdf>.

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Voir le document GEEE-9/2022/INF.4 intitulé « Challenges of big data and analytics-driven demand-side management » (problèmes posés par les mégadonnées et la gestion de la demande au moyen d'analyses).

20. La demande de données a augmenté de manière exponentielle ces dernières années, ce qui a entraîné une augmentation du nombre de centres de données, très gourmands en électricité. Bien que ceux-ci soient des moteurs importants du déploiement de nouvelles capacités de production d'énergie renouvelable (dans le cadre d'accords bilatéraux d'achat d'électricité) et même si l'on s'intéresse davantage aux interactions entre les données et la demande d'énergie depuis peu, il n'existe à l'heure actuelle aucune norme concernant les indicateurs de durabilité et la performance énergétique de ces centres.

21. En outre, le besoin accru de capacités de stockage et de traitement des données et l'application d'autres technologies numériques à des systèmes énergétiques en constante évolution nécessiteront – tout comme le processus global de transformation des systèmes énergétiques – des quantités importantes de matières premières essentielles. Dans le contexte géopolitique actuel et compte tenu de la flambée des prix enregistrée ces dernières années, les coûts croissants de la transformation numérique peuvent dissuader les décideurs de prendre des mesures décisives et immédiates en faveur de la transition numérique. Ce problème pourrait être résolu grâce à la technologie de la chaîne de blocs, qui permet la mise en place d'une infrastructure décentralisée comme, par exemple, d'un registre décentralisé des ressources énergétiques susceptible de renforcer également l'interopérabilité, la cybersécurité et l'efficacité des services énergétiques complémentaires. De nombreuses chaînes de blocs consomment aujourd'hui très peu d'électricité, car elles reposent sur un mécanisme de validation différent du mécanisme initial de validation par preuve de travail.

22. Il convient de mettre en place un système informatique interopérable, un réseau et une infrastructure de stockage pour recueillir les données provenant de multiples sources et dispositifs énergétiques et ainsi favoriser le partage, l'analyse et l'utilisation des flux de données. Ce faisant, les normes de cybersécurité doivent être prises en compte dès la conception, pour s'assurer que les composants de tous les systèmes y sont conformes. Tout projet d'investissement ou de recherche doit explicitement tenir compte des éléments de l'infrastructure technologique nécessaires à un déploiement réussi, en mettant l'accent sur les flux de données en temps réel, la sécurité des données, les normes d'interopérabilité, la synchronisation et la répartition, et aborder les questions de protection de l'identité et de confidentialité. Les logiciels open source doivent être privilégiés pour garantir l'interopérabilité requise.

23. Une autre conséquence des politiques climatiques actuelles, que l'on observe déjà dans de nombreuses zones géographiques, est le développement accru des ressources énergétiques décentralisées et l'apparition des prosommateurs. Ce phénomène s'accroîtra dans les années à venir, ce qui va rendre la planification très difficile pour les gestionnaires de réseaux. En outre, en raison de son caractère intermittent, la production des ressources énergétiques décentralisées (il s'agit principalement d'énergies renouvelables telles que celles issues des installations solaires en toiture) sera elle aussi difficile à gérer, car les opérateurs de système devront garantir le bon fonctionnement du réseau électrique général tout en répondant à la demande des prosommateurs pendant les heures creuses. Ainsi, le développement de l'écosystème des prosommateurs (qui comprend la gestion ou le stockage de l'énergie sur le réseau et à domicile) – qui repose entièrement sur des technologies et des services numériques – sera une source de difficultés pour les opérateurs de réseau. Cependant, si elles sont bien gérées, les ressources énergétiques décentralisées peuvent aussi apporter une solution au problème, en contribuant à la flexibilité du réseau et en réduisant la congestion. En effet, grâce à leurs capacités avancées, les nouvelles sources de charge, comme celles qui alimentent les véhicules électriques, permettent au réseau de gérer avec plus de souplesse une grande partie de la demande et fournissent des services de fiabilité essentiels, si elles ont été conçues à cet effet. C'est pourquoi il convient de faciliter les investissements individuels dans les ressources énergétiques décentralisées. Il s'agit notamment de simplifier le processus d'installation et d'autoriser les particuliers à participer plus activement aux marchés locaux de l'énergie en allégeant le processus de création de communautés énergétiques et d'autres types de microréseaux. Ces marchés locaux peuvent être une source précieuse de flexibilité, en particulier si le commerce entre pairs et au sein de la communauté est encouragé par la législation et, associé à la fourniture d'énergie à des tarifs variables, utilisé comme outil de gestion de la congestion par les opérateurs de réseau.

Il existe de nombreux projets de démonstration dans ce domaine, et il convient d'adopter une réglementation plus souple pour accélérer le déploiement à grande échelle de projets pilotes menés avec succès.

24. Dans le contexte géopolitique actuel, le thème de la cybersécurité revêt une importance encore plus grande. Bien qu'il existe des études de cas sur les cyberattaques contre des systèmes électriques dont on peut tirer des enseignements, aucune attaque généralisée et prolongée contre des infrastructures énergétiques essentielles n'a été enregistrée jusqu'à présent. Les systèmes étant de plus en plus numériques – et donc plus vulnérables aux risques en matière de sécurité – la nécessité de garantir la sécurité des données et d'avoir la confiance des utilisateurs est fondamentale si l'on veut accélérer la transformation numérique. La protection des systèmes contre les cyberattaques et la formation de professionnels dans ce domaine engendreront un coût financier. La question de la confiance entre les acteurs économiques et les entités politiques, notamment dans la chaîne d'approvisionnement, se posera également.

25. En outre, même en l'absence de cyberattaque, les utilisateurs seront sans doute de plus en plus préoccupés par les questions de confidentialité. Même si la transformation numérique permet d'éliminer l'interaction humaine avec les données de l'utilisateur – renforçant par-là la confidentialité des données personnelles –, les clients seront de plus en plus sensibles à la question du partage des données relatives à la demande d'énergie. Pour ces raisons, le renforcement du rôle et des responsabilités de tous les acteurs concernés (gestionnaires de réseau, fournisseurs d'énergie, agrégateurs de données, autorités centrales et locales, clients, prosommateurs, etc.) en matière de gestion des données jouera un rôle important dans les années à venir.

26. Comme dans d'autres processus de transformation, la transition numérique soulève d'importantes questions socioéconomiques liées au marché du travail, car sa diffusion entraînera une réduction des activités à forte intensité de main d'œuvre, et partant une perte potentielle d'emplois. Cependant, même si certaines activités deviennent obsolètes, ce processus engendrera de nombreux nouveaux sous-secteurs économiques. La planification, la production, l'installation, l'exploitation et la maintenance des différents composants des écosystèmes numériques se traduiront par la création d'emplois supplémentaires et créeront de la valeur ajoutée. Pour compenser les pertes d'emplois potentielles, des programmes cohérents de renforcement des compétences ou de reconversion doivent être élaborés avant le déploiement des écosystèmes numériques. Il est important de noter que la transformation numérique permettra également de renforcer le caractère inclusif du marché du travail et offrira de nouvelles possibilités à de nombreux groupes marginalisés de la société.

V. Conclusions et recommandations sur les politiques publiques permettant de tirer pleinement parti de la transformation numérique des systèmes électriques

27. Pour tirer pleinement parti de la transformation numérique des systèmes électriques, il faut bien comprendre les possibilités offertes par ce processus et déterminer les mesures à même de compenser ou de limiter les risques liés à sa mise en œuvre.

28. Les parties prenantes devront en priorité mettre en place des cadres réglementaires favorables et une infrastructure de base (par exemple, des compteurs intelligents) en appui à des modèles économiques nouveaux ou améliorés axés sur le passage au numérique des systèmes électriques. Pour développer une culture numérique durable et bien ancrée chez les clients, les propriétaires d'entreprises et les décideurs, il serait essentiel de sensibiliser le grand public aux avantages des services offerts par cette transformation numérique et accroître sa participation au marché de l'énergie. À court terme, les campagnes de sensibilisation – menées principalement par des groupes de réflexion, des ONG et des entreprises – peuvent susciter l'intérêt du grand public et inciter les clients actuels (qu'il s'agisse de ménages ou de consommateurs industriels) à adapter leur comportement et à envisager de jouer un rôle plus actif en tant que prosommateurs ou consommateurs au sein d'un microréseau ou d'un marché local de l'énergie. En parallèle, afin d'atténuer les effets de la transformation à court et à moyen terme, des campagnes de renforcement des

compétences et de reconversion ainsi que des formations doivent être organisées à l'intention des personnes employées actuellement dans le secteur, pour tirer parti des technologies numériques de plus en plus présentes dans les réseaux électriques et réduire les effets socioéconomiques de la transformation numérique sur les marchés du travail. Enfin, le fait de revoir les programmes universitaires actuels des disciplines techniques et des sciences sociales ou économiques afin qu'ils prennent en compte l'interaction entre les technologies numériques, les systèmes énergétiques et les objectifs de développement durable aura une incidence sur le long terme.

29. Il est essentiel d'associer les clients et la société civile, les entreprises, les autorités centrales et les décideurs locaux au processus de passage au numérique des réseaux électriques. On pourra ainsi évaluer de manière exhaustive les possibilités et les difficultés que cela présente, sachant que les politiques publiques envisagées n'auront pas les mêmes effets sur les différentes parties prenantes. En outre, les décisions prises avec une large participation de tous les types de parties prenantes permettront d'élaborer rapidement des stratégies, de les appliquer et de vérifier les résultats.

30. Le tableau 2 présente un ensemble de recommandations relatives aux politiques publiques et aux stratégies d'entreprise qui peuvent être appliquées pour appuyer le passage au numérique des systèmes électriques, et dont les effets sur le processus de décarbonisation, la sécurité de l'approvisionnement et le maintien de la fourniture d'électricité à un coût abordable seront très positifs.

31. Il convient, avant d'investir dans des installations d'approvisionnement énergétique, d'accorder la priorité aux moyens d'améliorer l'efficacité énergétique dans la production, le transport, la distribution et la consommation d'énergie, pour autant que la preuve de leur faisabilité soit établie sur les plans opérationnel, technique et économique afin de réduire la demande globale d'énergie et améliorer sa gestion. Dans ce contexte, il convient également de s'intéresser aux solutions numériques visant à améliorer l'efficacité énergétique, qui peuvent être déployées rapidement et produisent presque immédiatement des effets positifs et tangibles.

32. Le secteur de l'électricité est prêt à tirer parti de la transformation numérique. En exploitant les éléments de base de cette transformation, comme les plateformes de services, les appareils intelligents, l'informatique en nuage et les méthodes d'analyse avancées, les entreprises du secteur ont la possibilité d'augmenter la durée de vie des infrastructures, d'optimiser les flux du réseau électrique en utilisant des ressources flexibles et d'innover en proposant des services centrés sur le client. De nouveaux gisements de valeur pourraient également être exploités « au-delà de l'électron » en tirant parti des mégadonnées dans tous les secteurs. De même, les acteurs gouvernementaux pourraient mettre les technologies numériques au service de la transparence, de l'inclusivité et de la responsabilité dans la prise de décisions en matière de politique énergétique.

Tableau 2

Politiques publiques et stratégies d'entreprise pouvant être mises en œuvre pour renforcer l'utilisation des technologies numériques dans les systèmes électriques

<i>Politique/Stratégie d'entreprise</i>	<i>Impact</i>		
	<i>0-2 ans</i>	<i>2-5 ans</i>	<i>5-10 ans</i>
Donner la priorité aux solutions numériques dans le développement des infrastructures de base, par exemple en prévoyant le déploiement de compteurs intelligents dans les stratégies énergétiques et les plans de développement nationaux ou dans les investissements des autorités centrales et locales et des gestionnaires de réseaux, en mettant en avant les solutions interopérables et, le cas échéant, les logiciels open source	Faible	Élevé	Élevé
Appliquer des tarifs variables pour l'utilisation du réseau électrique et encourager le commerce entre pairs et au sein de la communauté pour stimuler les marchés locaux de l'énergie	Moyen	Élevé	Élevé

<i>Politique/Stratégie d'entreprise</i>	<i>Impact</i>		
	<i>0-2 ans</i>	<i>2-5 ans</i>	<i>5-10 ans</i>
Simplifier les procédures permettant de devenir un prosumateur et de bénéficier de subventions, et faciliter la mise en place et le fonctionnement de marchés locaux de l'énergie, tout en redéfinissant leur rôle sur les marchés de gros de l'électricité	Élevé	Élevé	Faible
Encourager les technologies de fourniture à la demande et le commerce local de l'énergie, entre les entreprises tout comme entre les ménages	Élevé	Élevé	Élevé
1) Élaborer des normes relatives au développement et à l'exploitation des centres de données existants et à la création de nouveaux centres (portant sur les aspects techniques et la consommation d'énergie), conformément aux politiques climatiques et énergétiques et 2) envisager des solutions de gestion des données décentralisée (gouvernance), notamment un registre décentralisé des ressources énergétiques pour appuyer l'efficacité énergétique et l'interopérabilité	Faible	Élevé	Élevé
Encourager une collaboration accrue entre les autorités publiques, les entreprises privées, la société civile et les universités à des fins de sensibilisation et de renforcement des compétences relatives aux technologies numériques dans le secteur de l'énergie	Élevé	Élevé	Élevé
Mettre davantage l'accent sur la recherche-développement de nouvelles technologies dans les systèmes électriques et veiller à la diffusion des projets pilotes réussis	Faible	Moyen	Élevé
Mener des programmes de renforcement des compétences et de reconversion pour les emplois menacés par un recours accru aux technologies numériques dans le secteur de l'énergie	Élevé	Moyen	Faible
Adapter le programme d'études actuel en ajoutant des matières liées au numérique afin que les futurs diplômés acquièrent une culture dans ce domaine	Faible	Moyen	Élevé
Planifier et mener des campagnes de sensibilisation pour promouvoir les avantages des services énergétiques numériques et répondre aux préoccupations (protection des données, confidentialité des données, etc.)	Faible	Moyen	Élevé
Élaborer des politiques en faveur de la cybersécurité et encourager les entreprises à accorder une plus grande attention à la question	Élevé	Élevé	Élevé

Annexe

L'Équipe spéciale de la transition numérique dans le domaine de l'énergie a élaboré un questionnaire d'enquête pour mieux comprendre de quelle manière les différents acteurs du secteur de l'énergie perçoivent et évaluent la transformation numérique, afin de mieux appréhender les problèmes et tirer parti des possibilités offertes par la transformation numérique des systèmes énergétiques nationaux. L'enquête a été menée du 1^{er} au 15 avril 2022 ; elle a permis de recueillir 60 observations provenant de 20 États membres de la CEE et de 11 États non membres. Bien que les résultats présentés ne soient pas très représentatifs pour certains pays, ils sont révélateurs de la façon dont le concept de transformation numérique est perçu au niveau mondial.

I. Questions

1. Quel est votre domaine de compétence/secteur d'activité ?*
 - a) Autorité publique ;
 - b) Secteur privé ;
 - c) Université ;
 - d) Groupe de réflexion/Organisation non gouvernementale (ONG) ;
 - e) Organisation internationale ;
 - f) Autre.
2. Dans quel pays êtes-vous le plus actif ?*
3. Qu'est-ce qui empêche ce pays de mettre en œuvre plus rapidement les technologies numériques ?*
 - a) Manque de sensibilisation au potentiel et aux avantages du passage au numérique des systèmes énergétiques ;
 - b) Idée selon laquelle les inconvénients de la transformation numérique l'emportent sur les avantages ;
 - c) Manque de financement pour la transformation numérique ;
 - d) Réticence à accorder la priorité aux investissements dans les technologies numériques (par rapport à d'autres objectifs) ;
 - e) Répercussions financières sur les consommateurs ;
 - f) Risques liés à la protection des données et à la cybersécurité ;
 - g) Préoccupations sociales (baisse des emplois manuels, concentration du marché, inclusion sociale, etc.) ;
 - h) Manque de compétences numériques (renforcement des compétences, reconversion, etc.) ;
 - i) Autre.
4. Que faut-il faire pour surmonter les obstacles énoncés ci-dessus ?
5. Dans votre pays, quels sont les principaux avantages que la transformation numérique pourrait apporter au secteur de l'énergie ?*
 - a) Avantages techniques (souplesse dans l'intégration des producteurs décentralisés, meilleure adéquation et flexibilité du réseau, efficacité au niveau du système et en ce qui concerne la consommation, etc.) ;
 - b) Avantages environnementaux (meilleure intégration de la production d'énergie renouvelable, économies d'énergie, meilleure intégration des autres modes de transport, etc.) ;

- c) Avantages sociaux (création d'emplois, croissance économique, etc.) ;
 - d) Avantages économiques (économies pour les entreprises de services publics de distribution et les clients, amélioration de l'accessibilité économique de l'énergie, etc.) ;
 - e) Acquisition de compétences (renforcement des compétences, reconversion, etc.) ;
 - f) Autre.
6. Quelles stratégies peuvent être mises en œuvre pour tirer parti des possibilités susmentionnées ?
7. Quelle est selon vous la plus grande difficulté à laquelle fait face votre pays en ce qui concerne les données, leur gestion et leur utilisation ?*
- a) Collecte de données (il s'agit de l'acquisition de données, et éventuellement de leur copie) ;
 - b) Gouvernance des données (notamment la conservation, la disponibilité, le partage et la sécurité) ;
 - c) Stockage, modélisation et normalisation des données (éventuellement en réponse aux besoins particuliers de l'utilisateur ou à des fins d'optimisation, en produisant par exemple des données détaillées pour l'analyse ou agrégées aux fins de notification ; pour le stockage des données, il s'agit également de l'administration des données (sauvegardes)) ;
 - d) Interprétation des données (l'analyste doit bien comprendre les définitions des données afin de les analyser) ;
 - e) Promotion des talents (le secteur évolue rapidement et l'évolution technologique est trop rapide pour être cantonnée à un secteur ; les universités doivent former des spécialistes immédiatement opérationnels) ;
 - f) Normalisation des modèles et des processus de données (normalisation des modèles de données et processus types dans le secteur des services publics de distribution, car les données brutes se présentent différemment selon leur provenance et le traitement des données et des modèles doit se faire de manière prévisible) ;
 - g) Autre
8. L'une de ces raisons vous a-t-elle empêché (et/ou vos partenaires/parties prenantes) par le passé, ou vous empêche-t-elle (et/ou vos partenaires/parties prenantes) de mettre en œuvre la transformation numérique ?*
- a) Les coûts/efforts nécessaires au changement étaient/sont trop importants ;
 - b) J'avais/j'ai peur d'échouer dans la mise en œuvre de la transformation numérique ;
 - c) La mise en œuvre de la transformation numérique ne m'a pas apporté /ne m'apporte pas suffisamment d'avantages ;
 - d) Je n'ai pas voulu/Je ne veux pas mettre en œuvre la transformation numérique ;
 - e) Je ne pensais pas/Je ne pense pas que la mise en œuvre de la transformation numérique vaille la peine ;
 - f) Je préfère me concentrer sur ce qu'il faut éviter de faire, plutôt que de fixer des objectifs à atteindre ;
 - g) Je pensais/Je pense pouvoir atteindre mes objectifs sans passer par la transformation numérique ;
 - h) Autre.

9. Comment évaluez-vous le niveau de connaissance des technologies numériques dans votre pays ?

Acteur	Niveau de connaissance des technologies numériques				
	Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
Pouvoirs publics (aux niveaux central et local)					
Entreprises					
Universités					
Groupes de réflexion/ONG					
Grand public/Clients					
Médias					

10. Quelles mesures concrètes proposeriez-vous pour améliorer le niveau de connaissance des technologies numériques des acteurs susmentionnés ?

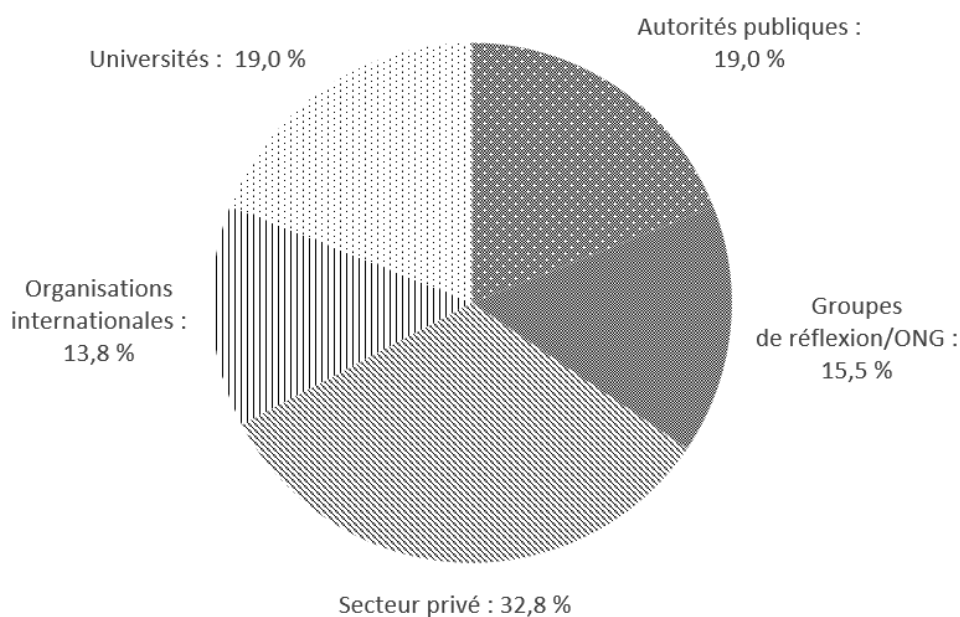
II. Réponses et interprétation des résultats

Répartition par secteur des répondants

La répartition des répondants est présentée dans la figure II.

Figure II

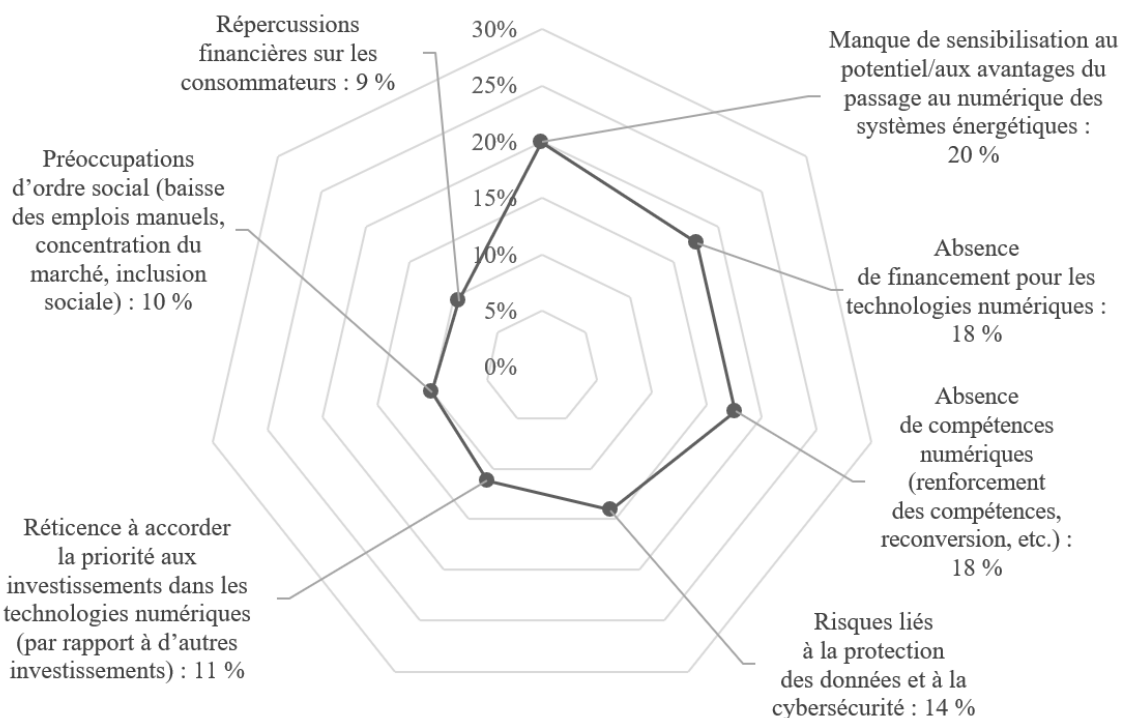
Répartition par secteur des répondants



A. Principaux obstacles empêchant les pays de mettre en œuvre la transformation numérique

1. L'enquête a montré que le manque de sensibilisation aux avantages des technologies numériques, l'absence de financement, ainsi que l'insuffisance des compétences numériques constituaient les principaux obstacles à une mise en œuvre accélérée des technologies numériques dans les systèmes énergétiques. La figure III présente les principaux obstacles qui empêchent les pays de mettre en œuvre plus rapidement les technologies numériques, tels qu'ils ressortent de l'enquête.

Figure III
Résultats de l'enquête : principaux obstacles empêchant les pays d'appliquer plus rapidement les technologies numériques



2. Les répondants ont notamment fait les suggestions suivantes concernant la manière de régler ces difficultés et de surmonter d'autres obstacles :

a) Sensibiliser les décideurs aux avantages du passage au numérique des systèmes énergétiques. Il faudrait pour cela : i) reconsidérer l'importance des technologies numériques en tant que secteur clef des économies nationales ; ii) mener des études et des analyses avec la participation étroite des parties prenantes, afin de mettre en avant les avantages concrets des investissements dans ce domaine ; iii) élaborer et mettre en œuvre des programmes de renforcement des capacités afin d'améliorer les connaissances de toutes les autorités concernées en matière de technologies numériques ;

b) Favoriser une meilleure coordination entre les différentes parties prenantes, telles que les entreprises de services publics de distribution, les gestionnaires de réseaux et les administrations locales ;

c) Créer des fonds spéciaux et des outils financiers au service d'investissements d'envergure pour le passage au numérique des secteurs de l'énergie ;

d) Améliorer le niveau de cybersécurité et communiquer au grand public les résultats obtenus, pour favoriser l'accroissement de la demande de technologies numériques parmi les clients ;

e) Augmenter le nombre de programmes éducatifs (dans les universités et les lycées) et de formations professionnelles (renforcement des compétences, reconversion) pour accroître progressivement le niveau de connaissance des technologies numériques des employés actuels et futurs du secteur de l'énergie ;

f) Organiser des campagnes de sensibilisation destinées au grand public.

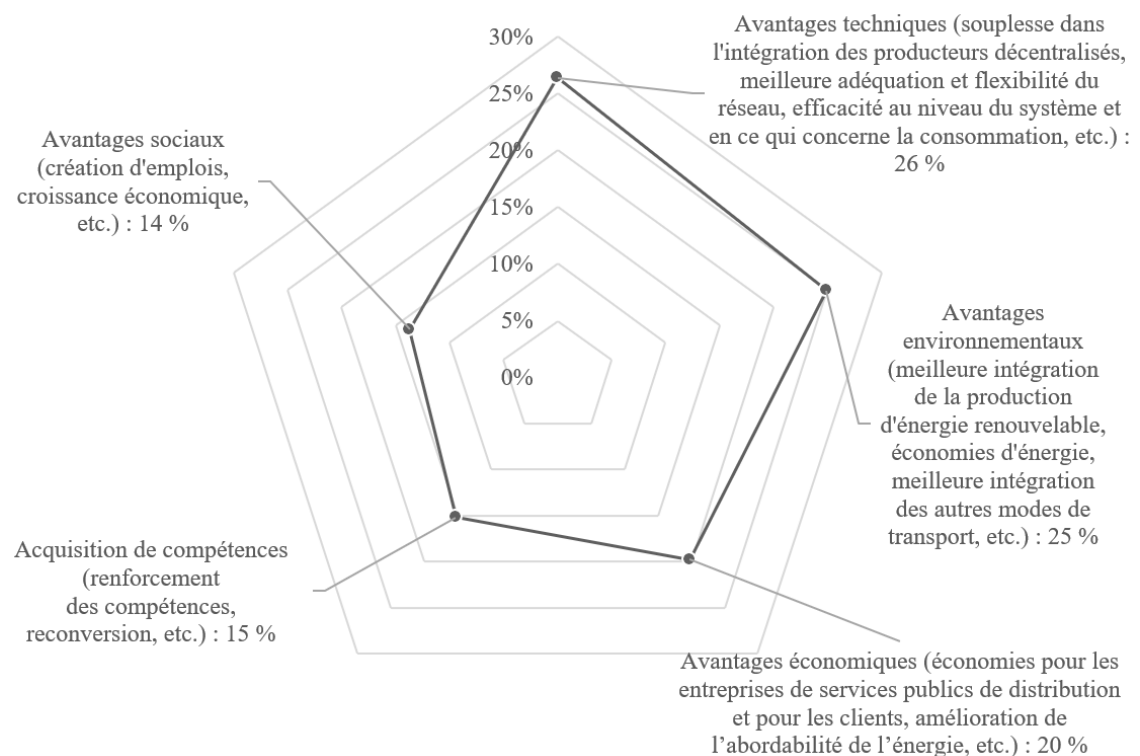
B. Principaux avantages que la transformation numérique pourrait apporter au secteur de l'énergie et stratégies pouvant être mises en œuvre pour en tirer parti

3. Même si les avantages socioéconomiques du passage au numérique du secteur de l'énergie ont été clairement reconnus par les répondants, ce sont les avantages techniques et environnementaux obtenus grâce à l'augmentation des investissements dans les technologies numériques qui ont été mis en avant.

4. D'après les résultats de l'enquête, les principaux avantages que la transformation numérique pourrait apporter au secteur de l'énergie sont les suivants (fig. IV).

Figure IV

Résultats de l'enquête : principaux avantages que la transformation numérique pourrait apporter au secteur de l'énergie



5. S'agissant des stratégies nécessaires à la mise en œuvre de la transformation numérique et à l'exploitation des avantages énumérés ci-dessus, les personnes interrogées ont formulé les propositions suivantes :

a) Sensibiliser davantage les décideurs aux avantages socioéconomiques d'un recours accru aux technologies numériques dans les systèmes énergétiques ;

b) Mieux informer le grand public. Il convient de promouvoir les avantages de la transformation numérique auprès des utilisateurs finaux, afin de susciter une demande venant de la base en faveur d'outils numériques plus performants pour la consommation et la gestion de l'énergie ;

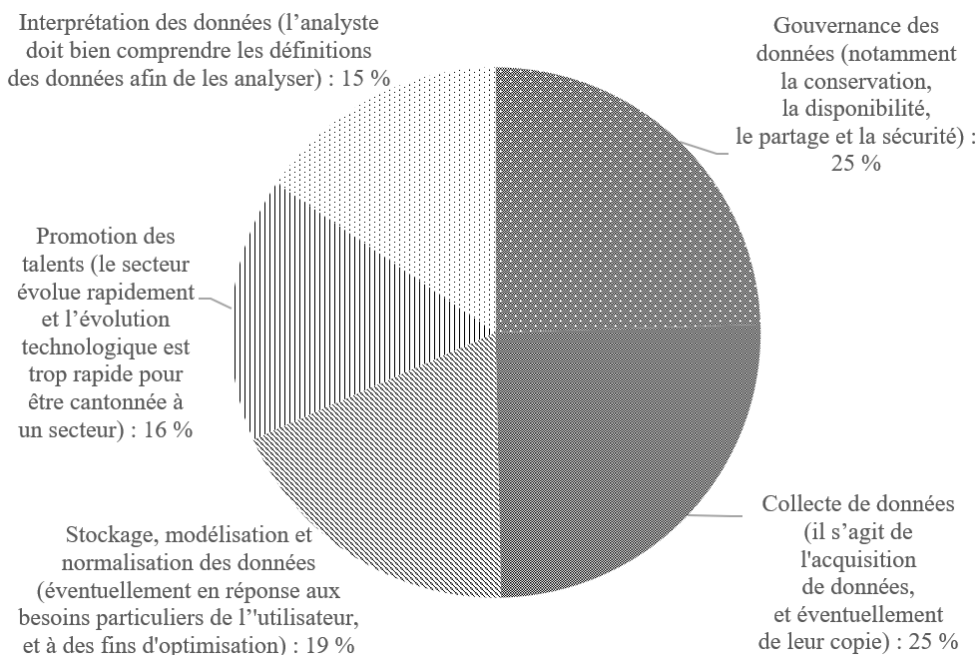
c) Utiliser les possibilités de financement comme solution permettant à la fois 1) de lancer des projets pilotes pouvant mettre en évidence différents avantages socioéconomiques et environnementaux et 2) de développer les projets de transformation numérique existants qui ont bien fonctionné afin que les systèmes et les clients puissent au mieux tirer parti des avantages de la transformation numérique.

C. Principales difficultés liées à la gestion et à l'utilisation des données

6. La moitié des difficultés relevées par les personnes interrogées concernent la gouvernance et la collecte des données, s'agissant des mégadonnées et de leur utilisation. Les principales difficultés relatives aux données, à leur gestion et à leur utilisation, telles que citées par les répondants, sont présentées dans la figure V.

Figure V

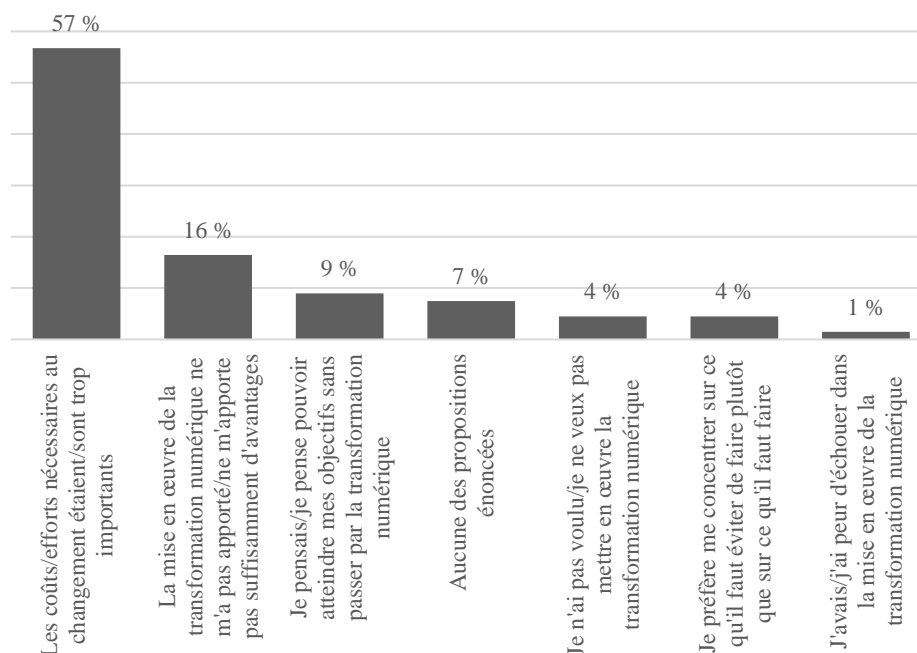
Résultats de l'enquête : principales difficultés liées à la gestion et à l'utilisation des données



D. Raisons qui freinent la transformation numérique du secteur de l'énergie

7. Selon les personnes interrogées et leurs partenaires, dans la plupart des pays les coûts et les efforts nécessaires à la mise en œuvre ou à l'utilisation accrue des technologies numériques dans le secteur de l'énergie constituent les principaux obstacles (fig. VI).

Figure VI
Résultats de l'enquête : principaux obstacles à la transformation numérique du secteur de l'énergie



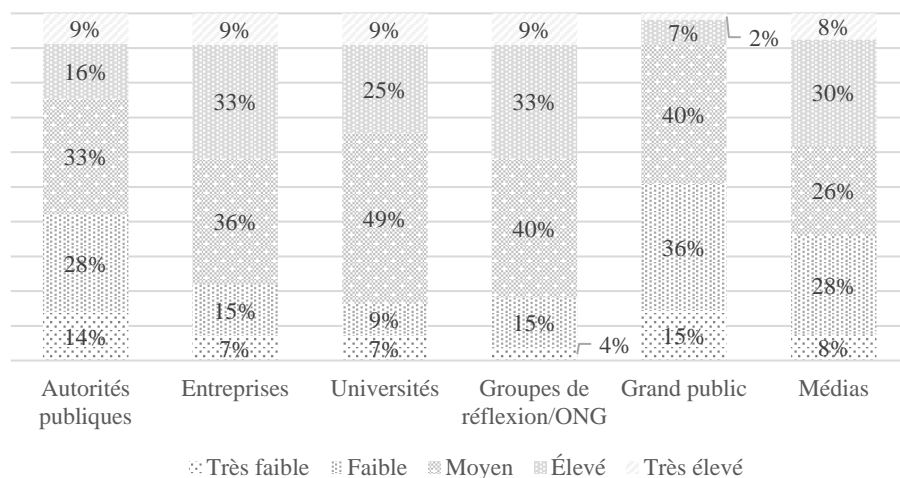
8. Dans une certaine mesure, cette question est liée aux besoins, évoqués précédemment, de créer des fonds spéciaux ou des outils de financement ou de réduction du risque pour accélérer le rythme de l'adoption des technologies numériques et augmenter leur taux de pénétration.

9. En outre, la méconnaissance des bénéfices de la transformation numérique (deuxième préoccupation citée par ordre d'importance) peut provenir soit d'une mauvaise compréhension de l'ensemble des avantages qu'elle procure, soit du fait que les technologies numériques ne sont pas suffisamment utilisées pour atteindre le seuil à partir duquel les différents avantages commencent à apparaître.

E. Niveau de connaissance des technologies numériques parmi les parties prenantes et pistes pour l'augmenter

10. D'après les réponses reçues, le secteur privé et les groupes de réflexion et ONG sont les catégories dans lesquelles le niveau de connaissance des technologies numériques est le plus élevé, suivies de près par les médias. De même que dans les réponses aux questions précédentes, les autorités publiques et le grand public affichent des niveaux de connaissance faibles ou très faibles (fig. VII).

Figure VII
Résultats de l'enquête : ventilation des réponses sur l'évaluation des connaissances des technologies numériques parmi certaines parties prenantes (en pourcentage)



11. Les solutions proposées en réponse aux questions précédentes constituent également des suggestions visant à améliorer le niveau de connaissance des parties prenantes :

- a) Mettre en place des programmes de formation et de renforcement des compétences et des programmes d'enseignement (dans les universités et les lycées) consacrés à la transformation numérique et à ses avantages dans le secteur de l'énergie ;
- b) Élaborer de meilleures stratégies de communication (notamment au moyen de campagnes dans les médias) pour promouvoir les avantages de la transformation numérique auprès des clients et des utilisateurs finaux ;
- c) Faire ressortir et promouvoir davantage le rapport coûts/avantages du passage au numérique des systèmes énergétiques.