

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

Genève, 20 et 21 septembre 2021

Point 7 de l'ordre du jour provisoire

**Libérer le potentiel d'efficacité énergétique
en s'appuyant sur la numérisation****Améliorer l'efficacité des bâtiments en s'appuyant
sur la numérisation – Recommandations de l'Équipe
spéciale de la transition numérique dans le domaine
de l'énergie****Note du secrétariat***Résumé*

Le secteur de la construction consomme plus d'un tiers du volume mondial d'énergie finale. Malgré une amélioration sensible de l'efficacité énergétique des bâtiments au cours des dernières décennies, on peut faire mieux. Il existe en effet de nombreuses technologies et solutions qui permettent d'améliorer la performance énergétique des bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels à tous les stades de leur cycle de vie (construction, occupation ou rénovation), et beaucoup d'entre elles font appel à la numérisation. Toutefois, pour libérer le potentiel d'efficacité énergétique des bâtiments en s'appuyant sur la numérisation, il est souvent nécessaire de faire avancer les politiques dans ce domaine.

Élaboré par l'Équipe spéciale de la transition numérique dans le domaine de l'énergie à partir d'observations factuelles, le présent document décrit la contribution que les technologies numériques pourraient apporter à l'efficacité énergétique des bâtiments. Il a pour but de sensibiliser les décideurs et les parties prenantes aux avantages, aux risques, aux incertitudes et aux compromis liés à la mise en œuvre de ces technologies, et contient d'importantes recommandations qui sont soumises pour examen au Groupe d'experts de l'efficacité énergétique et au Comité de l'énergie durable.



I. Introduction

1. La numérisation est souvent considérée comme un domaine d'innovation prioritaire pour le secteur de l'énergie. L'une des branches dans lesquelles la numérisation semble offrir le plus de promesse est celle du bâtiment, où elle pourrait, dit-on, réduire la consommation d'énergie de 10 % au niveau mondial d'ici à 2040 si elle était appliquée tout au long de la chaîne de valeur et du cycle de vie des bâtiments. Or, pour que cette ambition se réalise, certaines conditions doivent être réunies, notamment :

a) Une économie de l'énergie centrée sur le client. Il faut mettre en place des systèmes énergétiques dont le client se sent propriétaire et qui aide aussi le consommateur à comprendre quel rôle il peut jouer. La numérisation accélère la transition de tous les secteurs et de tous les systèmes vers un environnement qui est davantage centré sur le client ;

b) Une vision pour l'accélération de la transition vers la neutralité carbone. La réduction des émissions de carbone est un enjeu mondial, qui concerne tous les secteurs économiques et la société dans son ensemble. L'efficacité énergétique est une priorité pour le succès de la transition énergétique dans les nombreux pays qui ont été amenés à adopter des plans pour améliorer la performance des appareils, des bâtiments et des réseaux de distribution. Le raccordement à un réseau intelligent de bâtiments à base consommation illustre parfaitement comment l'utilisation coordonnée de capteurs (y compris l'Internet des objets), d'appareils intelligents et de signaux émis par le réseau peut améliorer l'efficacité énergétique du parc immobilier mondial ;

c) Une nouvelle génération de travailleurs qualifiés pour élargir les capacités mondiales. Pour la main-d'œuvre d'aujourd'hui, la transformation numérique présentera des avantages mais aussi des inconvénients auxquels il faudra remédier au moyen des politiques industrielles et des politiques de l'éducation, de la formation et de la requalification. La cybersécurité et la protection des données et de la vie privée figurent parmi les grands domaines dans lesquels des compétences spécialisées, et parfois transdisciplinaires, sont nécessaires pour réussir la transformation numérique. Plus précisément, il convient d'élargir le vivier de talents dans les domaines des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques et, surtout, ne pas négliger l'importance déterminante des compétences se situant au carrefour de disciplines aussi différentes que la technologie et les politiques publiques.

2. Dans ce contexte, le présent document analyse le rôle de la numérisation dans les bâtiments et examine les mesures qui semblent prometteuses pour optimiser le fonctionnement des bâtiments et de l'infrastructure énergétique dans son ensemble, en s'efforçant de présenter aux décideurs et aux parties prenantes un point de vue clair, concis et équilibré.

3. Le présent document passe en revue les possibilités qui existent dans le domaine de la numérisation et les avantages des mégadonnées et des méthodes d'analyse avancées pour optimiser la consommation d'énergie des bâtiments tout au long de leur cycle de vie ; il aborde le sujet de la protection de la vie privée des consommateurs et de la cybersécurité, traite en détail du rôle des centres de données et de leurs effets au regard de la problématique plus large de l'environnement, et étudie également la question de plus en plus importante du capital humain.

4. Enfin, le présent document invite les organes subsidiaires du Comité de l'énergie durable et d'autres organismes ou organisations concernés à unir leurs efforts pour étudier les avantages de la transition numérique du système énergétique et les obstacles à surmonter dans ce domaine.

II. Les mégadonnées dans les bâtiments

5. Partout dans le monde, on observe une augmentation constante du volume de données provenant du secteur de la construction, qui s'explique surtout par la forte augmentation du recours à l'Internet des objets et de la collecte d'informations provenant de sources telles que les systèmes de contrôle, les capteurs, les compteurs et les dispositifs portables. On prévoit un sensible accroissement de l'utilisation de ces dispositifs dans le secteur de la construction.

La technologie des capteurs et de la surveillance devrait permettre au secteur d'économiser environ 10 % de sa consommation totale d'ici à 2050. Les données collectées par ces appareils permettront de mieux connaître le parc immobilier et de prendre les mesures nécessaires à la réalisation de nombreux objectifs de développement durable. Notons aussi qu'une meilleure connaissance de la consommation d'énergie des bâtiments peut déboucher sur des décisions politiques mieux ciblées et une application plus précise de ces mesures.

A. Synergie entre les mégadonnées et les technologies d'intelligence artificielle dans le domaine de l'énergie

6. On entend par mégadonnées un volume de données considérable recueilli auprès de différentes sources ; le volume de ces données augmente à un rythme exponentiel. Les mégadonnées sont caractérisées par : 1) le volume (quantité de données) ; 2) la vélocité (vitesse de génération) ; 3) la variété (nombreux types de données) ; 4) la variabilité (ampleur des changements) ; 5) la véracité (fiabilité ou exactitude des données) ; 6) la visualisation (accessibilité et lisibilité des données) ; et 7) la valeur (but premier de la collecte de données, les données doivent avoir une valeur).

7. On entend par analyse des données, l'analyse informatique systématique autonome ou semi-autonome des données ou des statistiques ; elle se divise en quatre grandes catégories : 1) l'analyse descriptive ; 2) l'analyse diagnostique ; 3) l'analyse prédictive ; et 4) l'analyse prescriptive. L'analyse des données fait appel à des techniques très perfectionnées de traitement automatisé de l'information, qui ont pour but de donner une interprétation fine de ces données, et, éventuellement, de la situation ou du processus qu'elles décrivent. Elle va également plus loin, car elle contribue à faire des prévisions qui permettent de réduire la consommation d'énergie des bâtiments et d'augmenter le confort thermique de leurs occupants.

8. Compte tenu de la formidable augmentation du volume des mégadonnées, il faudrait des siècles pour analyser les données selon les méthodes classiques. L'intelligence artificielle (IA) est une méthode d'analyse avancée qui entretient une relation symbiotique très forte avec les mégadonnées en ce sens que la richesse de ces mégadonnées ne peut être exploitée sans l'IA et que l'IA a besoin de volumes énormes de données pour obtenir des résultats précis.

9. L'IA est un domaine scientifique interdisciplinaire : elle exploite les ordinateurs et les machines pour imiter des capacités décisionnelles qui, en règle générale, relèvent de l'intelligence humaine. L'augmentation de la puissance de traitement, la diminution des coûts de stockage et la disponibilité de quantités massives de données ont conduit à des avancées algorithmiques sans précédent dans le domaine de l'IA. L'apprentissage automatique est une branche de l'IA qui permet aux systèmes d'apprendre de manière autonome et d'améliorer leurs prestations à partir de l'expérience et de nouvelles données sans être spécialement programmés à ces fins. Il s'agit d'une technique bien connue qui, dans le bâtiment, consiste généralement à exploiter les données recueillies au profit des données de construction. L'apprentissage automatique est aussi constitué d'un ensemble d'algorithmes conçus pour permettre au logiciel d'« apprendre » par itération. Il prend trois formes : 1) l'apprentissage supervisé ; 2) l'apprentissage non supervisé ; et 3) l'apprentissage par renforcement¹. L'apprentissage profond est un sous-ensemble de l'apprentissage automatique qui s'inspire

¹ En bref, l'apprentissage supervisé consiste à fournir des données d'entraînement que l'algorithme utilise pendant le processus d'apprentissage pour vérifier qu'il fonctionne correctement et produit les bons résultats. L'apprentissage supervisé se divise en deux grands types : la régression et la classification. L'apprentissage non supervisé n'a pas l'avantage de disposer de données d'apprentissage auxquelles comparer ses résultats, car les données sont généralement imparfaites et n'ont pas toujours une structure bien formatée pour faciliter le travail des algorithmes. L'apprentissage non supervisé utilise le regroupement, la réduction de la dimensionnalité et l'estimation de la densité pour parcourir de grandes quantités de données et fournir des résultats significatifs pour faciliter la prise de décisions. L'apprentissage par renforcement se concentre sur la façon dont certains agents intelligents devraient se comporter ou agir en réponse à d'autres actions qui ont eu lieu, afin de maximiser la notion de récompense cumulative dans le processus. Il s'agit d'une technique basée sur le comportement avec un renforcement positif et négatif.

du fonctionnement du cerveau humain et dans lequel des réseaux neuronaux artificiels apprennent à partir d'une grande quantité de données. Les algorithmes de l'apprentissage automatique se divisent en apprentissage automatique classique et apprentissage profond.

B. Législation, réglementation et normes relatives à la numérisation des bâtiments à des fins d'économie d'énergie

10. Dans le domaine de l'innovation, la réglementation est cruciale ; elle exige une action résolue et, surtout, rapide. La consommation énergétique des bâtiments occupe une place importante à cet égard ; comme dans d'autres secteurs, le développement de la numérisation peut et va aider. Toutefois, pour que la numérisation puisse rapidement parvenir aux résultats escomptés – et ainsi contribuer à réduire la consommation d'énergie des bâtiments –, les progrès technologiques et l'innovation doivent être accompagnés et soutenus par des mesures réglementaires. La numérisation peut contribuer à rendre les bâtiments plus durables tout au long de leur cycle de vie (conception, construction, exploitation et entretien, et démolition), mais des normes doivent être définies à cette fin, et les approches qui permettront à la numérisation des bâtiments de se concrétiser doivent être soutenues par la législation et la réglementation.

11. Le plus souvent, les objectifs visés pendant le cycle de vie du bâtiment sont des objectifs financiers « du moindre coût » ; aussi faut-il que la législation et la réglementation défendent les intérêts des utilisateurs finaux en imposant des solutions d'efficacité énergétique suffisantes. C'est ainsi, par exemple, que la Directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique² prévoit une présentation synthétique du parc national de bâtiments fondée sur un échantillonnage statistique ; la fourniture d'informations actuelles sur la consommation des clients finals, y compris, le cas échéant, le profil de charge, la segmentation de la clientèle et la localisation géographique des clients ; la mise en place de systèmes intelligents de mesure et de compteurs intelligents ; la fourniture d'informations sur la consommation passée comprenant des données cumulées concernant au moins les trois dernières années, des données détaillées en fonction du moment où l'énergie a été utilisée, pour chaque jour, chaque semaine, chaque mois et chaque année, lesquelles doivent être mises à la disposition du client final via Internet ou l'interface du compteur.

12. D'autres exemples montrent que, pendant la phase de préconstruction, la numérisation 3D (par exemple, l'implantation d'un bâtiment par un système d'information géographique) permet à la fois d'optimiser l'implantation d'un bâtiment du point de vue des gains de chaleur solaire compte tenu de la zone climatique, et d'optimiser la gestion de projet et la logistique pour économiser des ressources. Pendant la phase d'exploitation et de maintenance, la numérisation peut permettre la mise en œuvre d'un système énergétique « actif » qui rend possible, entre autres choses, le contrôle actif et entièrement automatisé de la demande d'électricité et de chaleur et le basculement de l'autoconsommation à l'alimentation par le réseau. Les bâtiments peuvent contribuer de manière non négligeable à l'équilibrage des fluctuations de l'offre provenant des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, les applications de l'IA peuvent aider à prévoir les besoins individuels et, ainsi, permettre un fonctionnement prédictif et accroître la sécurité énergétique générale tout en assurant l'intégration des sources d'énergie renouvelables.

13. Toutefois, pour développer et appliquer ces solutions numériques, il faut non seulement disposer d'un appui de nature réglementaire mais aussi de normes techniques. Il est important que les systèmes d'information et les technologies correspondants soient interconnectés au niveau interne et également qu'ils disposent d'une interface spécifique avec l'environnement externe. C'est pourquoi, du point de vue technique, les systèmes correspondants doivent être ouverts et non propriétaires afin qu'il soit facile de développer les interfaces avec les systèmes d'information opérationnels.

14. Il est donc de plus en plus important d'utiliser des politiques d'innovation modernes. Concrètement, la question est de savoir comment la science et la recherche peuvent coopérer plus étroitement avec le secteur de la construction et celui de l'énergie afin de tester

² Disponible sur le site Web EUR-Lex (www.eur-lex.europa.eu).

rapidement et de manière ciblée les innovations numériques au sens le plus large du terme et, en particulier, d'en tirer rapidement les enseignements voulus afin que les applications puissent être mises en œuvre dans les meilleurs délais. Pour pouvoir réaliser les investissements nécessaires dans des bâtiments et des technologies numériques climatiquement neutres, les investisseurs ont également un besoin urgent d'être assurés de la sécurité de leurs investissements. En raison de l'importance de la question pour la société, l'élaboration de concepts non propriétaires, évolutifs et extensibles est une question d'ordre politique qui relève de la puissance publique et à laquelle il faut accorder la priorité.

III. Cartographie des technologies et des possibilités numériques

A. Technologies numériques applicables aux matériaux, aux produits, aux structures et aux systèmes d'ingénierie

15. Le secteur de la construction (y compris les phases de préconstruction et de construction) est en pleine évolution et va certainement continuer dans cette voie. On peut ranger les raisons de cette évolution en plusieurs catégories :

a) L'augmentation de la demande et de la réglementation relative à la réduction des effets environnementaux (les gouvernements augmentent l'efficacité énergétique et adoptent des objectifs d'émissions plus stricts, cependant que les clients se préoccupent davantage de l'impact environnemental des phases de construction et d'exploitation de leurs bâtiments) ;

b) L'évolution des préférences en ce qui concerne les bâtiments, en particulier dans la période post-COVID-19 (les clients, qu'il s'agisse de particuliers ou d'entreprises, demandent des bâtiments plus complexes, conçus pour être connectés, car l'intérêt des consommateurs passe du produit lui-même à l'utilisation de ses caractéristiques ; enfin, la COVID-19 a entraîné de nombreux changements sur le marché du travail et modifiera la demande de bâtiments individuels dans les années à venir) ;

c) La multiplication des possibilités offertes par la technologie (les nouvelles technologies, y compris les capteurs et les solutions intégrées matériel-logiciel complexes, offrent de nouvelles possibilités qui peuvent être mises en place pendant la phase de construction et servir pendant la phase d'exploitation des bâtiments) ;

d) Les nouvelles compétences professionnelles (les entreprises du secteur de la construction recrutent des professionnels formés, dotés de compétences dans le domaine des procédés numériques).

16. Dans ce contexte, les technologies et les procédés numériques définiront les matériaux, les produits, les structures, ainsi que les systèmes d'ingénierie impliqués dans le cycle de vie du bâtiment : de la phase de préconstruction à la phase de démolition, en passant par la construction et l'exploitation/maintenance.

17. L'un des éléments déterminants de cette transformation est la modélisation des informations de la construction (BIM) jusqu'à la maquette numérique en 6D, où la 3D est le modèle de partage des données, la 4D le séquençage des phases de construction, la 5D les coûts et la 6D les données sur le cycle de vie du projet (y compris l'évaluation de l'efficacité énergétique). Cet outil donne aux concepteurs les outils et les données nécessaires à une planification et une conception très efficaces des opérations, de la construction et des activités d'exploitation. En outre, l'inspection et la maintenance sont également prises en compte dans l'écosystème BIM, qui fournit des calendriers à long terme et des outils de gestion des actifs. Les modélisations BIM peuvent être utilisées aussi bien pour des constructions neuves que pour des rénovations, ce qui en fait un instrument d'innovation et de croissance durable.

18. Une technologie qui est de plus en plus utilisée dans les phases de préconstruction et de construction ainsi que pendant la phase d'exploitation/maintenance, est celle du jumeau numérique – le clone virtuel d'un actif physique, dont il figure la contrepartie numérique en temps réel, tout au long du cycle de vie du bâtiment. Cette technologie fournit des données et des informations et procure de nombreux outils aux promoteurs et aux exploitants de

bâtiments qu'elle aide à concevoir des actifs plus efficaces pendant la phase d'exécution du projet ou pendant la phase d'exploitation/maintenance. Si l'utilisation de la technologie du jumeau numérique dès la phase de préconstruction s'avère utile, il est possible aussi d'élaborer des modèles rétrospectifs, à condition de disposer de données en temps réel pour l'actif construit, d'où la nécessité d'équiper les bâtiments de capteurs.

19. L'utilisation des technologies et des procédés numériques va également avoir des répercussions sur le secteur des matériaux et des produits de construction. Par exemple, si, dans le bâtiment, l'impression 3D reste encore un service de niche, il y a fort à parier qu'elle y entraîne des changements significatifs à l'avenir. Parmi les avantages de l'impression 3D, on peut citer l'utilisation très efficace des matériaux de construction (presque plus aucun déchet), une plus grande efficacité opérationnelle et une réduction des dépenses opérationnelles (les imprimantes 3D pouvant fonctionner en continu, les chantiers sont finis plus rapidement et, en même temps, certains coûts liés à la main-d'œuvre sont réduits). Grâce aux technologies numériques, on peut également réduire les dépenses opérationnelles liées à l'exploitation/maintenance. Par exemple, la législation et la réglementation nationales sur les audits énergétiques obligatoires adoptées dans plusieurs pays européens ont conduit au développement de logiciels qui utilisent les mégadonnées pour recenser et évaluer des solutions possibles d'amélioration de l'efficacité énergétique. L'étiquetage de la performance énergétique se fait également au moyen d'outils numériques et de logiciels conçus à cet effet.

B. Technologies numériques appliquées aux bâtiments

20. Pour surmonter les difficultés liées à l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique, par exemple faire correspondre l'offre et la demande d'énergie dans des délais très courts, il est nécessaire de tirer parti des possibilités offertes par les bâtiments intelligents. Cela signifie qu'il faut intégrer des millions d'unités et de dispositifs de consommation et de production décentralisés présents dans les bâtiments dans un système énergétique dont ces unités et dispositifs deviennent acteurs. L'intégration verticale va des véhicules électriques, des pompes à chaleur et des électrolyseurs pour les services système aux marchés locaux, régionaux ou nationaux de l'électricité, en passant par les unités décentralisées comme les unités de stockage photovoltaïque privées. Les technologies numériques peuvent être mises à contribution pour améliorer l'efficacité des bâtiments aux différentes phases de leur cycle de vie en facilitant le développement des moyens de production d'énergie décentralisée, telle l'installation de panneaux solaires et d'unités de stockage photovoltaïque privées, en permettant aux producteurs de stocker et de vendre plus facilement l'électricité et la chaleur excédentaires au réseau et en les incitant à le faire.

21. En ce qui concerne l'optimisation des ressources à l'échelle du système, les outils comme les systèmes avancés de gestion de la distribution (ADMS – Advanced Distribution Management System), les systèmes de gestion des ressources énergétiques décentralisées (DERMS – Distributed Energy Resource Management System) et les contrôleurs de microréseaux sont considérés comme des solutions éprouvées et très prometteuses. En conséquence, l'un des principaux obstacles à l'intégration des ressources énergétiques décentralisées (DER – distributed energy resource) semble demeurer la validation et le partage d'informations clés sur les caractéristiques, les capacités, les relations et les comportements qui permettent précisément d'optimiser le système. Tout comme les banques sont tenues d'effectuer des contrôles afin de vérifier l'identité de clients potentiels, d'évaluer si les produits sont adaptés à leur profil et de gérer les risques, les gestionnaires de réseau doivent valider et enregistrer chaque actif qui fournit des services au réseau électrique. Les principaux problèmes demeurent l'intégration dynamique et l'information d'état dynamique en temps réel : tout dispositif qui souhaite participer à un marché de l'électricité donné doit d'abord se doter d'une identité numérique sécurisée afin de pouvoir coordonner ses activités avec les autres systèmes et participants.

22. Il est nécessaire que les unités au sein des bâtiments ainsi que les droits qui leur sont associés soient vérifiés de façon électronique en temps réel afin de garantir la minimisation des coûts de transaction et une interaction sécurisée et dynamique. L'identité numérique des individus et des machines deviennent ainsi un rouage essentiel dans le contexte des bâtiments intelligents et économes en énergie. L'objectif des dispositifs de l'économie de l'énergie,

y compris les bâtiments intelligents, est faire en sorte que les unités décentralisées puissent basculer librement et de manière dynamique entre l'autoconsommation, les services système et le marché de l'électricité : plus les participants sont nombreux et plus les interactions sont fréquentes (c'est-à-dire plus les marchés sont grands et liquides), plus le système énergétique est efficace, rentable et respectueux de l'environnement.

23. Les unités décentralisées contribueront à une plus forte utilisation des réseaux électriques en fournissant des services système. C'est pourquoi, il faut assouplir les valeurs et développer les possibilités des bâtiments raccordés aux réseaux basse tension en mettant en place des solutions numériques qui s'adaptent en temps réel à la manière d'un réseau réactif. Dans l'ensemble, l'intégration de dispositifs en aval du compteur (BTM – behind-the-meter) exige un cadre réglementaire souple et évolutif, tout comme leur agrément pour accéder aux marchés concurrentiels de l'électricité. L'étape clef dans ce contexte est l'identité numérique, qui permet à chaque unité d'interagir avec le réseau et de participer au marché de l'énergie.

C. Production intelligente d'énergie et part des prosommateurs

24. Les réseaux intelligents sont définis en général comme des réseaux énergétiques capables de surveiller automatiquement les flux d'énergie et, ainsi, de s'adapter à l'évolution de l'offre et de la demande. La technologie numérique, qui permet une communication dans les deux sens entre le service public de distribution et ses clients numérisés, et la détection au long des lignes de transmission et de distribution sont ce qui rend le réseau intelligent. Grâce aux contrôles avancés, ces systèmes énergétiques peuvent réagir et s'adapter rapidement aux variations de l'offre et de la demande, tout en maintenant un équilibre entre les deux. Ils permettent donc une flexibilité opérationnelle et apportent une réponse dynamique aux besoins de charge.

25. Souvent fondées sur les DER, les unités de production intelligentes se situent principalement dans les bâtiments ou à proximité ; peu encombrantes, elles sont faciles à autoriser et à installer près du lieu de charge, ce qui réduit l'infrastructure requise. Les DER renvoient généralement à de petites sources de production géographiquement dispersées, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou la production combinée de chaleur et d'électricité, installées et exploitées sur le réseau de distribution à des niveaux de tension inférieurs aux niveaux habituels du réseau électrique exploité à 100 kV et plus.

26. Dans les bâtiments, il existe une catégorie de consommateurs d'énergie actifs, souvent appelés « prosommateurs », qui produisent et consomment de l'énergie électrique et thermique, brouillant les frontières entre les deux rôles. Le passage du rôle de consommateur à celui de prosommateur est rendu possible, en partie, par l'essor des nouvelles technologies connectées et la progression constante des ressources contrôlées localement, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et les véhicules électriques à recharge bidirectionnelle connectés aux réseaux électriques. Il existe différents types de prosommateurs qui vont des prosommateurs privés qui produisent de l'électricité ou de l'énergie thermique chez eux aux associations de production citoyennes, en passant par les prosommateurs commerciaux dont l'activité principale n'est pas la production d'électricité ou d'énergie thermique et les institutions publiques comme les écoles ou les hôpitaux. Comme elles ne sont pas encore pleinement développées, les DER tendent, pour le moment, à se répartir de manière inégale entre prosommateurs et bâtiments, ce qui peut freiner leur pleine exploitation pendant encore un certain temps.

27. Les bâtiments intelligents pourraient agir comme des microréseaux connectés, facilitant la gestion de la demande et, par exemple, s'isolant du réseau pendant les périodes de pointe, les pannes ou les cyberattaques. Œuvrant en coordination avec l'opérateur du réseau, ils contribueraient également à rendre le réseau plus intelligent et plus résilient. Les bâtiments commerciaux et industriels à forte consommation d'énergie peuvent également être acteurs de la maîtrise de la demande en énergie (DSR – demand side response). Ils peuvent augmenter ou diminuer leur consommation en fonction des besoins du réseau et intervenir immédiatement pour le rééquilibrer et prévenir les pannes et autres défaillances graves. Les technologies de stockage sont également essentielles à une plus forte utilisation

des énergies renouvelables dans le secteur de la construction, car elles permettent d'optimiser le coût de l'énergie en même temps qu'elle assurent le confort des utilisateurs en permettant le déplacement de la charge. La technologie Vehicule-to-Grid (V2G – réinjection de l'énergie stockée par les batteries dans le réseau) est aussi très prometteuse pour ce qui est de la contribution à la gestion du réseau pendant les heures de pointe, et les bâtiments pourraient jouer un rôle décisif dans les services de recharge des véhicules électriques et l'intégration véhicules-réseau.

28. L'intégration de la production intelligente, du réseau intelligent, du stockage, des technologies des véhicules électriques, des consommateurs et des prosommateurs, et d'autres technologies ainsi que des différentes parties prenantes transformera l'ensemble du système d'énergie électrique et thermique et remettra en question le modèle économique classique des services publics de distribution de l'énergie. Elle s'accompagnera toutefois de nouvelles exigences en matière de sécurité du système et de nouveaux risques pour la vie privée des individus. Il importe donc que les principes fondamentaux de conception, d'ingénierie et d'exploitation sur lesquels cette transformation va s'appuyer prévoient des mesures préventives et correctives pertinentes et solides, y compris en matière de cybersécurité.

IV. Questions relatives à la sécurité et à la protection de la vie privée

29. Lorsque l'on exploite un bâtiment, la sécurité joue un rôle essentiel non seulement sur le plan physique, mais aussi sur le plan numérique. La sécurité n'est pas importante seulement pour ceux qui vivent ou qui travaillent dans le bâtiment, elle l'est aussi pour ses propriétaires, pour ceux qui gèrent les systèmes connectés au bâtiment et pour ceux qui traitent et utilisent les données générées par ces systèmes. Une chose importante pour la sécurité numérique est la sécurité des données (y compris la cybersécurité, la sécurité des informations et la confidentialité des données).

30. La sécurité des données comprend la cybersécurité et la sécurité de l'information, dont la confidentialité des données est un aspect. La cybersécurité, également appelée « sécurité informatique », concerne la protection des ordinateurs, des serveurs, des appareils mobiles, etc. contre les attaques malveillantes, c'est-à-dire contre le piratage. La cybersécurité est essentielle à la sécurité des données, car les attaques malveillantes peuvent notamment avoir pour but de pénétrer dans un système afin d'obtenir un accès non autorisé aux données. La sécurité des données consiste à protéger les données contre l'accès non autorisé, les attaques malveillantes et l'exploitation. Mais elle comporte un autre aspect qui est la sécurité de l'information et qui consiste à protéger les individus et les entreprises contre l'utilisation non autorisée de l'information (confidentialité), à s'assurer que l'information est disponible lorsque l'on en a besoin (disponibilité) et à garantir l'exactitude de cette information (intégrité). La sécurité des données et de l'information est une condition préalable à une autre préoccupation importante de l'ère numérique : la confidentialité des données.

31. La confidentialité des données concerne le droit de l'individu de contrôler la manière dont les informations personnelles le concernant sont collectées et utilisées. Par exemple, en Europe, les règles relatives à la confidentialité des données sont énoncées dans le Règlement général sur la protection des données (RGPD)³ ; aux États-Unis, on peut citer la Californie et le California Consumer Privacy Act (CCPA – Loi sur la protection de la vie privée des consommateurs de la Californie)⁴. Ces deux règlements visent à rendre la vie en ligne plus sûre, en exigeant des entreprises qu'elles précisent, par exemple, quelles données elles traitent, qu'elles définissent la finalité du traitement des données et qu'elles donnent aux clients la possibilité de refuser que leurs données soient utilisées.

³ Disponible sur le site Web (www.eur-lex.europa.eu).

⁴ Disponible sur le site Web d'information concernant la législation californienne (www.leginfo.ca.gov).

A. Techniques de protection de la vie privée et de la sécurité

32. Une question importante qui se pose est celle de savoir comment l'on peut, dans le contexte des bâtiments, assurer la cybersécurité, la sécurité des données, la sécurité de l'information et la confidentialité des données et faire en sorte que le risque de violation et d'utilisation abusive des données soit réduit au minimum. Pour ce faire, les entreprises doivent intégrer la sécurité dès la conception du bâtiment et des systèmes fondées sur les technologies de l'information et des communications (TIC). Par exemple, les résidents d'un bâtiment voudront peut-être faire circuler les signaux Internet via les câbles électriques ; pour que ces signaux ne soient pas accessibles des autres appartements, chaque appartement doit disposer de son propre circuit.

33. Il faut intégrer les tests de sécurité dès l'élaboration du système TIC d'un bâtiment. Ainsi, les problèmes de sécurité peuvent être résolus plus tôt et, en principe, plus rapidement. De plus, les enseignements qui sont tirés des problèmes rencontrés permettent d'améliorer la sécurité des futurs systèmes. Les tests peuvent comprendre les audits de code et les tests d'intrusion automatisés. Le test d'intrusion consiste à simuler une cyberattaque contre un système informatique afin d'évaluer son niveau de sécurité et doit être effectué au plus tard juste avant la mise en service du système.

34. En ce qui concerne la sécurité de l'information, les entreprises qui veulent minimiser le risque de violation et d'utilisation abusive des données doivent se doter de règles précises relatives, par exemple, aux mots de passe, à l'accès physique aux bâtiments, au cryptage, à l'utilisation des médias sociaux, aux sauvegardes et à la confidentialité des données. Lorsque de telles règles sont définies, il faut réaliser des audits pour vérifier qu'elles sont appliquées. Ces audits peuvent, par exemple, être réalisés dans le cadre de la certification de la gestion de la sécurité de l'information (ISO 27001)⁵.

B. Conséquences des failles de sécurité et des fuites de données

35. L'importance de la cybersécurité et de la sécurité des données dans les bâtiments apparaît clairement lorsque l'on considère ce qu'il peut en coûter de les négliger. Si l'on ne veille pas à sécuriser les données, les pirates informatiques peuvent, par exemple, obtenir des données sur la consommation d'énergie et savoir quand les résidents sont absents de leur domicile et, éventuellement, planifier une opération de piratage.

36. Lorsque la cybersécurité est insuffisante, les pirates informatiques peuvent, par exemple, accéder aux données sur l'énergie en profitant d'une faille de sécurité dans l'application qui contrôle l'approvisionnement. Un scénario du même type peut se produire dans le cas où l'information n'est pas suffisamment sécurisée, par exemple lorsque des employés obtiennent un accès non autorisé à l'application. On peut aussi arriver à des situations similaires lorsque la confidentialité des données n'est pas assurée, par exemple, lorsque les données sont obtenues et traitées alors que les résidents n'ont pas donné leur autorisation. Ces exemples montrent que les effets de la négligence dépassent largement les frontières du monde numérique et peuvent également causer des dommages physiques. En fait, dans un cas extrême, toute la sécurité énergétique peut être menacée : lorsque des pirates informatiques sont en mesure de faire augmenter massivement la consommation d'énergie de tous les bâtiments, le système énergétique peut tomber en panne ; on parle alors d'attaque par déni de service.

V. Rôle des centres de données et implications

37. Les centres de données sont la pierre angulaire de l'infrastructure numérique, et les besoins traitement et de stockage des données sont en constante augmentation pour soutenir le déploiement des technologies intelligentes dans les bâtiments. Un centre de données est un bâtiment dédié ou une pièce qui abrite l'infrastructure de traitement, de stockage et de communication des données d'une ou de plusieurs organisations. Cet espace est

⁵ Disponible sur le site Web de l'Organisation internationale de normalisation (www.iso.org).

exclusivement réservé au matériel informatique et à l'infrastructure d'alimentation et de refroidissement nécessaire. Les centres de données fonctionnent sur la base de deux principaux types d'actifs : 1) l'infrastructure physique, c'est-à-dire le bâtiment et les équipements ; et 2) la prestation de services, c'est-à-dire le stockage, la gestion et la maintenance, et la sécurité des données. L'économie numérisée repose sur les données et la connectivité Internet. Les centres de données sont un élément fondamental de l'infrastructure numérique à l'origine de l'augmentation du volume des données générées par de nombreuses activités des secteurs public et privé.

38. Les centres de données sont des bâtiments très énergivores qui ont besoin de 10 à 100 fois plus d'électricité par unité de surface que les autres bâtiments commerciaux. On estime que les centres de données représentent environ 1 à 1,5 % de la consommation totale d'énergie dans le monde, soit quelque 200 TWh d'électricité. Comparée à l'augmentation du volume de données au cours de la dernière décennie, la hausse de la consommation d'énergie des centres de données dans le monde a été modeste, grâce aux mesures d'efficacité énergétique. Alors que la consommation d'énergie a augmenté de 6 % entre 2010 et 2018, le nombre d'instances de calcul dans les centres de données a augmenté de 550 %. De plus, les centres de données sont à l'origine d'environ 0,3 % des émissions mondiales de carbone, et l'écosystème des TIC dans son ensemble de plus de 2 % des émissions mondiales. À titre de comparaison, l'empreinte carbone des TIC se situe au même niveau que celle de l'industrie aéronautique.

39. En dehors du fait qu'ils sont très gourmands en énergie et qu'ils soulèvent bien des préoccupations du point de vue de la durabilité, les centres de données sont aussi producteurs de chaleur excédentaire. La chaleur résiduelle produite par les activités des centres de données peut être captée et utilisée dans les réseaux de chauffage urbain ou par les clients du voisinage ; cela permet d'augmenter les économies d'énergie et d'améliorer l'efficacité du système dans son ensemble. Le développement de technologies d'approvisionnement énergétique nouvelles et modernes résulte de la synergie entre le chauffage et le refroidissement urbains, l'électricité, les énergies renouvelables et les énergies issues du traitement des déchets intégrés au sein d'un système intelligent, qui a aussi besoin de bâtiments « intelligents sur le plan énergétique » ou « numérisés » comme utilisateurs finaux. Ces derniers seraient en mesure de savoir quel type d'énergie est disponible sur le marché et de choisir de l'utiliser. Ainsi, les consommateurs opteront pour l'énergie la plus intéressante économiquement, tandis que le réseau énergétique du quartier peut être mieux équilibré.

40. L'indicateur le plus largement répandu pour évaluer les performances de durabilité des centres de données est l'indicateur d'efficacité énergétique (PUE – power usage effectiveness), qui mesure le rapport entre l'électricité utilisée par l'équipement informatique et l'électricité fournie au centre de données. Au-delà de la consommation d'énergie, plusieurs indicateurs ont été mis au point récemment, qui mesurent l'efficacité carbone des centres de données – indicateur du rendement carbone (CUE – carbon usage effectiveness) - et les ressources en eau utilisées – indicateur de la consommation d'eau (WUE – water usage effectiveness). Ces indicateurs se concentrent sur l'efficacité énergétique et sur les énergies renouvelables, s'agissant non seulement des systèmes informatiques mais aussi des systèmes de refroidissement et d'alimentation électrique. Toutefois, ces mesures et paramètres s'intéressent principalement à l'aspect énergétique de l'activité des centres de données, mais ignorent les dommages qu'ils causent aux écosystèmes, à la santé humaine et aux ressources naturelles. De plus, la plupart des évaluations sont conçues pour surveiller les opérations des centres de données, mais négligent l'impact que les activités de construction et de transport et les activités liées à la fin de vie des différents composants des centres de données peuvent avoir sur l'environnement.

41. Pendant la phase d'exploitation, le potentiel des centres de données en matière d'efficacité énergétique réside principalement dans les équipements informatiques, le système de refroidissement et le système d'alimentation électrique. Parmi les solutions qui existent pour améliorer l'efficacité énergétique, on peut citer la consolidation des serveurs, le remplacement des puces et des serveurs pour gagner en efficacité opérationnelle, l'utilisation de la chaleur des serveurs pour le chauffage urbain, le refroidissement passif à l'air et à l'eau, le passage à des centres de données de très grande échelle (centres hyperscale), le refroidissement des serveurs à l'aide de matériaux isolants et l'utilisation de l'IA pour réguler le système de refroidissement. Outre les solutions d'efficacité énergétique, les

exploitants de centres de données hyperscale étudient également comment ils peuvent contribuer à la décarbonisation de leurs opérations en s'alimentant en énergies renouvelables au moyen d'installations photovoltaïques ou éoliennes. Le lieu d'implantation du centre est un facteur critique qui doit être pris en compte lorsqu'on cherche à augmenter la part des énergies renouvelables dans l'alimentation. Les autres facteurs clefs à considérer sont, par exemple, la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement énergétique, la stabilité du réseau électrique et la température annuelle moyenne du lieu d'implantation.

42. Il convient de noter que les impacts environnementaux découlant des phases de préexploitation et de postexploitation du centre de données sont aussi importants que les impacts découlant de l'exploitation. Par exemple, les équipements des centres de données nécessitent l'extraction, la fabrication et l'élimination de grandes quantités de métaux. Ces activités peuvent entraîner des pénuries de matériaux et des pollutions aux métaux, qui peuvent à leur tour causer des dommages aux écosystèmes et à la santé humaine. Si l'amélioration de l'efficacité énergétique par le remplacement fréquent du matériel reste l'objectif principal, il est possible de réaliser des économies d'énergie et de réduire les émissions de carbone pendant la phase d'exploitation ; toutefois, à plus long terme, cela entraînera une augmentation de la consommation de matériaux et de la pollution associée. Pour éviter de transférer les charges d'une phase à l'autre du cycle de vie des centres de données, il convient d'envisager soit l'amélioration de l'efficacité des matériaux pendant la fabrication des équipements, soit l'amélioration de la réutilisation et du recyclage de ces matériaux lorsque les équipements arrivent en fin de vie.

43. Enfin, pour assurer que la consommation d'énergie des centres de données est contrôlée de manière efficace et efficiente à chaque étape de leur cycle de vie, il faut disposer de compétences bien supérieures en matière de données publiques et de modélisation. Afin d'élaborer des politiques fondées sur des données factuelles et les évaluer, les décideurs des pays doivent mettre en place des systèmes de collecte de données et d'archivage ouverts solides.

VI. Améliorer le capital humain

44. L'efficacité énergétique est l'un des vecteurs essentiels de la réalisation des objectifs climatiques et de la reprise économique. C'est un secteur à forte intensité de main-d'œuvre qui offre d'importantes possibilités d'emploi. Les emplois liés à l'efficacité énergétique se développent rapidement, et l'on peut penser que d'autres emplois qui exigent des compétences dans le domaine des TIC afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments (mais pas uniquement) vont voir le jour. Le travail de rénovation ou de conception de bâtiments nouveaux fera appel à des spécialistes capables d'utiliser les outils BIM. Les compétences dans le domaine des TIC sont également nécessaires pour le déploiement, l'exploitation sécurisée et la maintenance des technologies numériques dans les bâtiments (par exemple, capteurs, Internet des objets, gestion de l'énergie, IA, maintenance prédictive, etc.). De plus, dans bon nombre de ces nouveaux emplois, il faudra des compétences spécialisées (par exemple, cybersécurité, analyse des mégadonnées, codage, etc.), indispensables pour concevoir et mettre en service les systèmes sécurisés adaptés aux besoins du client. En outre, les mégadonnées collectées dans les bâtiments devront également être traitées, évaluées et interprétées, afin que les concepteurs puissent comprendre ces besoins et élaborer de nouveaux produits et services. Cela créera de nouveaux marchés et alimentera la demande de main-d'œuvre.

45. On constate qu'il existe sur le marché un écart entre l'offre et la demande de compétences numériques pour le secteur de la construction. Si de nombreux facteurs y contribuent, cet écart s'explique principalement par l'inertie typique du secteur de l'énergie en ce qui concerne l'adoption de procédés et de technologies numériques. En outre, le changement des comportements et des modes de vie des consommateurs et de leurs habitudes de consommation d'énergie, en partie causé par la pandémie de COVID-19, ainsi que les efforts résolus pour investir dans les mesures d'efficacité énergétique en raison des enjeux environnementaux pressants vont faire augmenter la demande de compétences numériques dans le secteur de l'énergie.

46. S'il est indispensable d'investir dans le renforcement des capacités de la main-d'œuvre existante, il ne faut pas pour autant négliger la main-d'œuvre de demain. Il est nécessaire d'agir de façon collective pour renforcer les capacités de la main-d'œuvre existante en matière de TIC et la requalifier, et l'enseignement primaire, secondaire et supérieur doit dispenser un enseignement formel des TIC pour former la future main-d'œuvre. L'augmentation des possibilités d'apprentissage à plusieurs niveaux contribuera à retenir sur place les personnes ayant des compétences en matière de TIC, qui pourront ensuite être recrutées par les fournisseurs de solutions d'efficacité énergétique des bâtiments et, plus largement, par le secteur de l'énergie. Pour parvenir à ce résultat, il pourrait être nécessaire de recourir à des modèles de partenariat public-privé dans lesquels les entités privées pourraient fournir des prévisions sur la main-d'œuvre dont elles auront besoin, expliquer les compétences qui lui sont nécessaires, organiser des sessions de formation et contribuer à l'élaboration des programmes d'enseignement.

VII. Conclusions et recommandations

47. Compte tenu de ce qui précède, l'Équipe spéciale de la transition numérique dans le domaine de l'énergie⁶ estime qu'il convient de formuler les principales conclusions et recommandations suivantes :

a) Collaboration plus étroite et recherche de consensus. Le secteur de la construction est très complexe : il compte de nombreuses parties prenantes, et ses valeurs et priorités sont diverses. Une collaboration plus étroite sera essentielle pour tirer pleinement parti du potentiel des technologies numériques et construire des bâtiments durables. Le partage de l'information et la recherche du consensus entre les professionnels de l'énergie et les spécialistes du numérique sont indispensables à la progression vers l'adoption de pratiques durables dans les bâtiments ;

b) Rôle important des normes techniques et cahier des charges pour la mise en œuvre. Les normes techniques ont des répercussions environnementales, économiques et sociales de grande portée. Les technologies numériques qui sont intégrées dans les bâtiments à tous les stades de leur cycle de vie (préconstruction, construction, exploitation/maintenance, et démolition) doivent être encadrées par des normes techniques strictes et assorties d'un solide cahier des charges pour leur mise en œuvre afin de garantir leur efficacité et leur efficacité à long terme. Les normes techniques des technologies numériques intégrées aux bâtiments contribueront également à modifier l'équilibre entre les intérêts des entreprises concurrentes et les priorités des gouvernements nationaux. Il convient également de noter que les normes techniques relatives à un produit donné ne sont la seule chose qui compte ; la façon dont ce produit communique avec les autres dispositifs qui équipent le bâtiment, et les normes sous-jacentes, est également importante ;

c) Réglementation positive et protectrice. Les TIC évoluent très rapidement. Il faut adopter des réglementations positives pour faciliter les investissements en faveur de la transition numérique du secteur de la construction et la mise en œuvre rapide des TIC. Les technologies numériques s'accompagnent également d'une grande volatilité et de fortes incertitudes, et des mesures juridiques et réglementaires claires seront nécessaires au niveau local, national et international pour protéger les individus, les organisations, ainsi que l'infrastructure générale du secteur de la construction ;

d) Appui à la science et à la recherche. Le secteur de la construction a un rôle central à jouer dans la mise en place d'une économie à émission de carbone faible ou nulle. Les politiques nationales d'innovation doivent considérer l'innovation dans le secteur de la construction comme une priorité et aider la science et la recherche à coopérer plus étroitement avec ce secteur et avec celui de l'énergie ainsi qu'avec les professionnels des TIC concernés. Le pilotage des innovations numériques et leur mise à l'essai itérative rapide, dans un espace de microsimulation réglementaire ou dans le cadre de projets pilotes, sont indispensables à une mise en œuvre à grande échelle ;

⁶ Voir : <https://unece.org/sustainable-energyenergy-efficiency/digitalization-energy>.

e) Considérations relatives à la sécurité et à la protection de la vie privée. Avec l'arrivée des innovations numériques centrées sur le client, le modèle économique classique des services publics de distribution est menacé ; en conséquent, ces services publics explorent et testent une série de modèles capables de relever les défis du secteur de l'énergie des bâtiments et de répondre aux demandes des clients. Toutefois, ces nouveaux modèles et une interaction accrue de parties prenantes multiples au sein du système s'accompagnent de risques inédits pour sa sécurité et pour la vie privée. Des mesures préventives et correctives énergétiques doivent être prévues dans le cadre des politiques et des réglementations nationales afin d'éviter tout événement extrême et la mise en danger des individus, des organisations ou des infrastructures ;

f) Durabilité des centres de données. L'intégration des technologies numériques dans la construction ne saurait en aucun cas compromettre l'efficacité et la durabilité des centres de données. Pour éviter tout effet de rebond, il convient d'envisager des stratégies et des mesures de consolidation des serveurs, d'amélioration de leur efficacité opérationnelle, d'utilisation de la chaleur résiduelle pour le chauffage urbain, de systèmes de refroidissement basés sur les énergies renouvelables, de systèmes intelligents de contrôle du refroidissement et d'utilisation accrue des énergies renouvelables pour l'alimentation électrique. La collecte active de données sur l'énergie et les émissions des centres de données et leur publication sont également indispensables et contribueront à l'élaboration de stratégies nationales utiles ;

g) Stratégie nationale en matière de compétences numériques. Il existe une forte pénurie d'aptitudes et de compétences numériques, et il sera impossible de tirer pleinement parti des technologies numériques tant qu'une stratégie nationale englobant la formation de la main-d'œuvre future et la requalification de la main-d'œuvre existante n'aura pas été élaborée. Le développement des compétences numériques, compte tenu du potentiel du secteur de la construction, doit avoir en ligne de mire l'amélioration de la durabilité des bâtiments, l'augmentation des nouvelles possibilités d'emploi et la réduction des risques et des conséquences involontaires liés à une plus forte intégration des technologies numériques ;

h) Données de haute qualité, accessibles et ouvertes. Des données solides peuvent être utiles pour acquérir une meilleure compréhension des processus décisionnels du secteur de la construction (construction, exploitation/maintenance et déconstruction), le rendre plus transparent (par exemple, demande de ressources, consommation d'énergie, normes d'efficacité, entre autres) et permettre l'utilisation de nouvelles méthodes (IA/apprentissage automatique) pour éclairer, le moment venu, les décideurs politiques et les chefs d'entreprise qui prennent les décisions les plus importantes en vue de la décarbonisation du secteur de la construction.
