

dossier.

Digitalisierung und Vertrauen

Energiesystem der Zukunft | Der Aufbau eines nachhaltigen Energiesystems ist ohne Digitalisierung nicht umsetzbar. Dabei bietet die automatisierte Steuerung dezentraler Ressourcen viele Möglichkeiten für den Einsatz von Flexibilität.



Digitalisation et confiance

Systeme énergétique du futur | La digitalisation est essentielle à la réalisation d'un système énergétique durable. Dans ce contexte, la gestion automatisée des ressources décentralisées offre de nombreuses possibilités d'exploitation de la flexibilité.

ASTRID NIESSE, JANNIKA MATTES, SEBASTIAN LEHNHOFF

Der Aufbau eines nachhaltigen Energiesystems ist ohne Digitalisierung nicht denkbar. Automatisierte Steuerung, datenbasierte Prognosen und intelligente Vernetzung eröffnen neue Möglichkeiten, um Energie effizient, flexibel und kostengünstig zu nutzen. Doch je stärker Maschinen Entscheidungen treffen, desto drängender wird eine andere Frage: Wie bleibt der Mensch in dieser digitalisierten Energiewelt handlungsfähig – und wie entsteht Vertrauen in Systeme, die wir kaum mehr vollständig überblicken können? Anhand aktueller Themen werden diese Fragen hier diskutiert. Es wird ein Bild gezeichnet, in dem technische Systeme und menschliche Akteure über die Digitalisierung eng zusammenwirken, um die Transformation im Spannungsfeld von Versorgungssicherheit und Klimazielen zu erreichen.

Zunächst stellen wir uns die Frage, inwieweit der Mensch mit seinen individuellen Vorstellungen in einem vollautomatisierten System repräsentiert werden kann. Die Forschung an Multi-Agentensystemen erlaubt hier neue Wege, nicht nur das menschliche Individuum, sondern auch Interaktionen auf der Ebene von Agenten abzubilden.

In der Bevölkerung haben sich in den letzten Jahren Vorbehalte gegenüber dem Ausbau erneuerbarer Energien und der flächendeckenden Digitalisierung (z. B. mittels Smart Metering) entwickelt, welche die Akzeptanz aufgrund unklarer Auswirkungen auf den eigenen Komfort, die Mündigkeit und den Datenschutz gefährden. Fehlendes Vertrauen verlangsamt die Transformation des Energiesystems. Daher müssen die Bedingungen für die Entstehung vertrauenswürdiger technologischer Systeme in den Blick genommen werden. Dieser Thematik ist der zweite Abschnitt gewidmet. Im dritten Abschnitt stellen wir uns die Frage, wie diese Erkenntnisse über persönliche Bedarfe und Bedürfnisse sowie die entwickelten Konzepte eines menschlichen und technischen Vertrauens in die Entwicklung der Systeme der zukünftigen Energiewirtschaft eingebracht werden können.

Vollautomation und Selbstorganisation - und der Mensch?

Intelligente Software-Agenten stellen in den unterschiedlichsten Bereichen die Grundlage für eine Vollautomation von Prozessen dar. Auch in Energiesystemen werden Agenten und sogenannte Multi-Agentensysteme (MAS) mittlerweile in ersten kommerziellen Produkten eingesetzt. Wie aber können Endnutzer nachvollziehen, wie diese Systeme Entscheidungen treffen? Das Problem verschärft sich, wenn individuelle Agenten über eine Fähigkeit zum eigenständigen Lernen verfügen und sich mehrere Agenten zu einem selbstorganisierten Agentensystem zusammenschliessen, um beispielsweise gemeinsam an der Stabilisierung von Stromsystemen zu arbeiten.

PV-Anlagen, Batteriespeicher, Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge stellen Flexibilitäten dar. Um diese dezentralen Komponenten ökonomisch effizient und koordiniert zu betreiben, braucht es intelligente Steuerungs-

La mise en place d'un système énergétique durable est inconcevable sans la digitalisation. Le contrôle automatisé, les prévisions basées sur les données et la mise en réseau intelligente offrent de nouvelles perspectives pour utiliser l'énergie de manière efficace, flexible et rentable. Mais plus les machines prennent de décisions, plus une question devient urgente: à quel point l'être humain reste-t-il capable d'agir dans ce monde énergétique digitalisé – et comment instaurer la confiance dans des systèmes que nous ne pouvons plus appréhender dans leur globalité? Ces questions sont abordées ici à travers divers thèmes d'actualité. Une vision se dessine, dans laquelle les systèmes techniques et les acteurs humains interagissent étroitement grâce à la digitalisation afin de mener à bien cette transformation – entre les impératifs de la sécurité d'approvisionnement et les objectifs climatiques.

Il s'agit, dans un premier temps, d'examiner dans quelle mesure l'être humain, avec ses représentations individuelles, peut être pris en compte dans un système entièrement automatisé. Les recherches menées sur les systèmes multi-agents ouvrent ici de nouvelles perspectives permettant de représenter non seulement l'être humain en tant qu'individu, mais aussi les interactions entre agents.

Ces dernières années, la population a exprimé des réserves croissantes à l'égard du déploiement des énergies renouvelables et de la digitalisation à grande échelle (par exemple via le comptage intelligent). Ces réticences compromettent l'acceptation de ces technologies, en raison d'effets perçus comme incertains sur le confort personnel, l'autonomie individuelle et la protection des données. Or, ce manque de confiance ralentit la transformation du système énergétique. Il est donc essentiel d'analyser les conditions nécessaires à l'émergence de systèmes technologiques fiables. La deuxième partie de cet article est consacrée à cette problématique. Enfin, la troisième partie s'intéresse à la manière d'intégrer les connaissances relatives aux attentes et aux besoins individuels ainsi que les concepts de confiance – tant technique qu'humaine – dans la conception des systèmes énergétiques du futur.

Automatisation complète et auto-organisation - et l'être humain?

Les agents logiciels intelligents constituent la base de l'automatisation complète des processus dans de nombreux domaines. Dans le secteur énergétique aussi, des agents et des systèmes multi-agents (SMA) sont désormais intégrés dans de premiers produits commercialisés. Mais comment les utilisateurs finaux peuvent-ils comprendre les mécanismes décisionnels de ces systèmes? La question devient d'autant plus complexe lorsque des agents individuels disposent de capacités d'apprentissage autonome et que plusieurs agents interconnectés forment un système auto-organisé, par exemple pour collaborer à la stabilisation des réseaux électriques.



Der Mensch und die Technik

Vertrauen ist eine Voraussetzung für das Funktionieren künftiger Energiesysteme.

L'homme et la technologie

La confiance constitue une condition essentielle au bon fonctionnement des systèmes énergétiques de demain.

systeme – nicht nur in einzelnen Haushalten, sondern auch als koordinierendes, hochautomatisiertes Gesamtsystem. In Haushalten können autonome Software-Agenten als Heimenergiemanagementsysteme (HEMS) agieren. Dabei werden in der Regel drei Optimierungsziele verfolgt: die Minimierung der Betriebs- bzw. Strombezugskosten, die Minimierung der CO₂-Emissionen sowie die Maximierung des Komforts für die Hausbewohnenden. Diese mehrdimensionale Zielsetzung erfordert transparente, adaptive und am Ende auch nachvollziehbare Entscheidungsprozesse.

Auf der Ebene von Quartieren können sich die Agenten zu einem selbstorganisierten Multiagentensystem vernetzen und als gebündelte Flexibilitäten Engpässe in Stromnetzen beheben. Unter Selbstorganisation wird dabei die Fähigkeit des Systems verstanden, gemeinsame Ziele

Les installations photovoltaïques, les systèmes de stockage par batterie, les pompes à chaleur et les véhicules électriques offrent une flexibilité précieuse. Pour exploiter ces ressources décentralisées de manière coordonnée et économiquement efficace, des systèmes de contrôle intelligents sont nécessaires – non seulement au sein des foyers, mais aussi à l'échelle d'un système global hautement automatisé et coordonné. Dans les ménages, des agents logiciels autonomes peuvent agir en tant que systèmes de gestion de l'énergie domestique (Home Energy Management System, HEMS), poursuivant généralement trois objectifs: la réduction des coûts d'exploitation ou d'approvisionnement en électricité, la diminution des émissions de CO₂ et la maximisation du confort des occupants. Cette approche multidimensionnelle exige des processus décisionnels transparents, adaptatifs et compréhensibles.

eigenständig zu verfolgen und sich ohne den Eingriff einer übergeordneten Überwachungskomponente an Veränderungen im Systembetrieb anzupassen.

Solche Systeme werden aber nur dann akzeptiert und damit genutzt, wenn sie als vertrauenswürdig erlebt werden. Nachvollziehbarkeit, Zuverlässigkeit sowie die Abbildung von Interessen der Bewohner sind hier wesentliche Aspekte.

Auf der Systemseite wiederum gilt: Versprochene Flexibilitätäten müssen mit sehr hoher Zuverlässigkeit erbracht werden, damit Netzbetreiber mit Multiagentensystemen als verlässlichem Partner arbeiten können. Vertrauen wird damit zur zentralen Voraussetzung: Nur wenn Menschen den Systemen vertrauen, werden sie deren Entscheidungen akzeptieren und mittragen. Das gilt sowohl für Endkunden als auch für Netzbetreiber, die sich auf die zugesagte Flexibilität technisch wie organisatorisch verlassen müssen. Vertrauen ist damit kein blosses «weiches» Thema, sondern eine harte Bedingung für das Funktionieren künftiger Energiesysteme. Wie aber kann der erste Schritt in diesem komplexen Gefüge gelingen – die Modellierung des vielschichtigen Vertrauenskonzeptes im sozio-technischen System?

Computational Trust und menschliches Vertrauen

Vertrauen bedeutet im Kern Zuversicht in die Zuverlässigkeit eines Systems oder einer Person. In der digitalen Welt spricht man vom Computational Trust – also von algorithmischen Mechanismen, die die Vertrauenswürdigkeit von Daten, Diensten oder Akteuren bewerten. Für sozio-technische Systeme wie die der Energieversorgung sind beide Blickwinkel von hoher Relevanz. So kommunizieren vermehrt technische Komponenten miteinander und müssen einschätzen, wie vertrauenswürdig die anderen Komponenten und erhaltenen Daten sind.

Die Systeme der Energieversorgung werden zudem durch menschliche Operatoren in Leitwarten überwacht und gesteuert. Für diese Operatoren stellt sich die Frage, inwieweit sie darauf vertrauen können, dass Teile des fernüberwachten Energieversorgungssystems seine Aufgaben erfüllen. Dafür stützen sich die Operatoren auf die Aufbereitung von Messwerten aus dem Feld, die über Leitsysteme übertragen werden. So treffen einerseits Computational Trust (Algorithmen in Leitsystemen, welche die Vertrauenswürdigkeit des Energieversorgungssystems, seiner Komponenten und Daten einschätzen) und andererseits menschliches Vertrauen (die subjektive Einschätzung des Operators) aufeinander.

Neben Operatoren, die Energieversorgungssysteme überwachen und steuern, interagieren auch immer mehr Kunden direkt mit dem Energiesystem – insbesondere als Prosumer. Für diese Kunden sind andere Vertrauensaspekte relevant, u.a. Fairness, Transparenz, Datenschutz und Mündigkeit.

Netzbetreiber müssen also die Leistung und Zuverlässigkeit von Energieversorgungssystemen gut einschätzen können und auch den Menschen in diesen Systemen vertrauen.

À l'échelle des quartiers, les agents peuvent se mettre en réseau pour former un système multi-agents auto-organisé capable de mutualiser les flexibilités disponibles afin d'éliminer les congestions dans les réseaux électriques. La notion d'auto-organisation désigne ici la capacité du système à poursuivre de manière autonome des objectifs communs et à s'adapter aux changements dans le fonctionnement du système sans supervision centralisée.

De tels systèmes ne seront toutefois acceptés et utilisés que s'ils sont perçus comme dignes de confiance. La traçabilité, la fiabilité et la prise en compte des intérêts des habitants constituent ici des conditions essentielles.

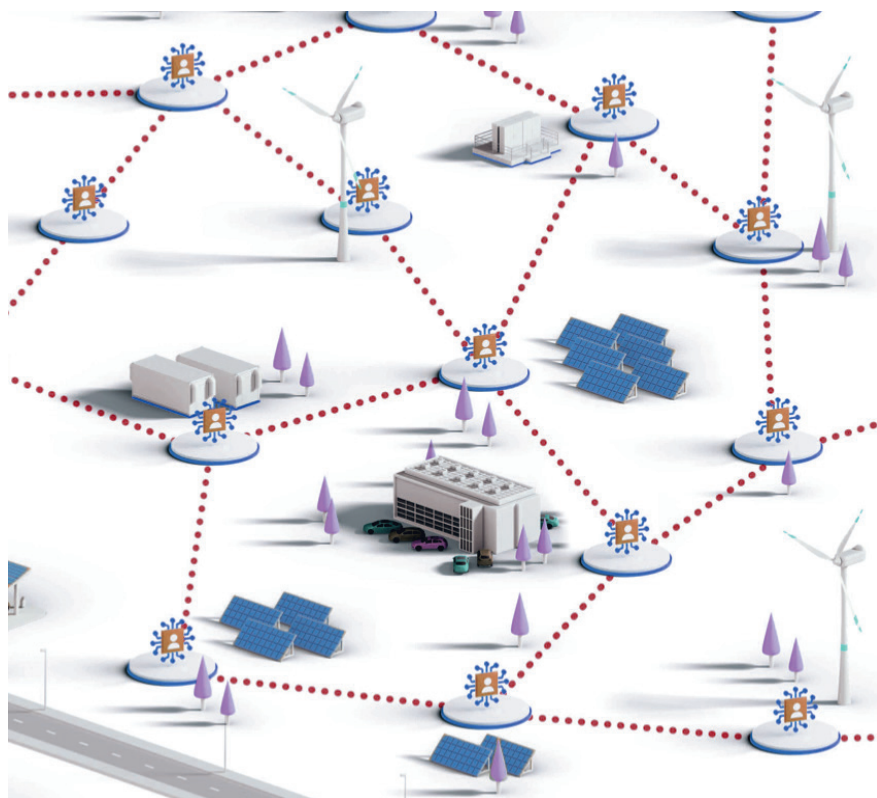
Du côté du système, les flexibilités promises doivent être fournies avec une fiabilité élevée, afin que les gestionnaires de réseau puissent considérer les systèmes multi-agents comme des partenaires fiables. La confiance devient ainsi une condition préalable essentielle: ce n'est que si les gens font confiance aux systèmes qu'ils acceptent et soutiendront leurs décisions. Cela vaut autant pour les clients finaux que pour les gestionnaires de réseau, qui doivent pouvoir compter sur la flexibilité promise, tant sur le plan technique qu'organisationnel. La confiance ne constitue donc pas un thème secondaire, mais une condition indispensable au bon fonctionnement des futurs systèmes énergétiques. Mais comment réussir la première étape de cette structure complexe, à savoir la modélisation du concept de confiance à plusieurs niveaux dans un tel système socio-technique?

Confiance computationnelle et confiance humaine

Avoir confiance signifie essentiellement être sûr de la fiabilité d'un système ou d'une personne. Dans le monde numérique, on parle de confiance computationnelle (computational trust), c'est-à-dire de mécanismes algorithmiques qui évaluent la fiabilité des données, des services ou des acteurs. Dans les systèmes socio-techniques tels que ceux de l'approvisionnement énergétique, ces deux points de vue sont particulièrement pertinents: les composants techniques doivent de plus en plus interagir et évaluer mutuellement leur fiabilité ainsi que celle des données reçues.

Les opérateurs humains, qui surveillent et contrôlent les systèmes d'approvisionnement en énergie depuis des salles de contrôle-commande, s'appuient sur le traitement des données mesurées sur le terrain, transmises par les systèmes de contrôle, pour juger de la fiabilité de fonctionnement des composants à distance. Ainsi, deux formes de confiance se rencontrent: la confiance computationnelle (algorithmes dans les systèmes de contrôle qui évaluent la fiabilité du système d'approvisionnement en énergie, de ses composants et des données) et la confiance humaine (évaluation subjective de l'opérateur).

Outre ces opérateurs, de plus en plus de clients, notamment les prosommateurs, interagissent directement avec le système énergétique. Pour eux, d'autres aspects de la



Multi-Agentensysteme werden bereits in ersten kommerziellen Produkten eingesetzt, beispielsweise um das Stromnetz zu stabilisieren.

Les systèmes multi-agents sont déjà utilisés dans de premiers produits commercialisés, par exemple pour stabiliser le réseau électrique.

Dafür müssen technisches und menschliches Vertrauen zusammen gedacht und in einem gemeinsamen Modell beschrieben werden.

Interdisziplinäre Forschung – von Informatik und Energietechnik bis Soziologie und Psychologie – entwickelt derzeit Modelle, um menschliches Vertrauen und Computational Trust zu einem gemeinsamen Rahmen zu verschmelzen. Nur so lassen sich Systeme entwerfen, die nicht nur technisch zuverlässig, sondern auch sozial legitimiert sind.

Bedarfe und Bedürfnisse abbilden

Bei der Entwicklung digitalisierter Energiesysteme muss eine grosse Vielfalt an Akteuren mitgedacht werden. Neben Betreibern und Entwicklern rücken dabei insbesondere Verbraucher und Prosumer in den Blick. Wie aber betrachtet man die Interaktion dieser Menschen mit den verschiedenartigen, zunehmend digitalen Technologien schon während ihrer Entwicklung?

Dabei fordert die Energiewende den Menschen einiges ab: Aus einer technologischen Perspektive heraus werden Verbrauchsverhaltensanpassungen bis hin zu Komforteinschränkungen erwartet. So sollen energieintensive Prozesse aus Netzstabilitäts- oder ökonomischen Gründen zeitlich verlagert werden. Zugleich verändern sich soziale Konstellationen beispielsweise durch neue Kooperationsmöglichkeiten in Form von Energiegemeinschaften oder Energy Sharing.

Wie aber können digitalisierte Systeme so entwickelt werden, dass Menschen diese erforderlichen Systeme also tatsächlich einsetzen? Hier setzt die Idee der reflexiven

confiance sont essentiels: l'équité (fairness), la transparence, la protection des données et la capacité d'agir de manière autonome.

Les gestionnaires de réseau doivent donc être en mesure d'évaluer correctement les performances et la fiabilité des systèmes d'approvisionnement en énergie, mais aussi de faire confiance aux personnes impliquées dans ces systèmes. Pour cela, la confiance technique et la confiance humaine doivent être envisagées conjointement et intégrées dans un modèle commun.

La recherche interdisciplinaire – de l'informatique et des technologies énergétiques à la sociologie et à la psychologie – élabore actuellement des modèles visant à intégrer la confiance humaine et la confiance computationnelle dans un cadre commun. C'est la seule façon de concevoir des systèmes qui soient non seulement fiables sur le plan technique, mais aussi légitimes sur le plan social.

Représenter les besoins et les attentes

Lors du développement de systèmes énergétiques digitalisés, il est essentiel de prendre en compte la diversité des acteurs impliqués. Outre les exploitants et les développeurs, les consommateurs et les prosummateurs jouent un rôle de plus en plus important. Mais comment intégrer l'interaction de ces personnes avec des technologies variées et de plus en plus digitales dès leur conception?

La transition énergétique exige beaucoup des individus: d'un point de vue technologique, on attend d'eux qu'ils adaptent leurs comportements de consommation,

Technikentwicklung an. Sie versteht Technik nicht als fertiges Produkt, sondern als Teil eines gesellschaftlichen Aushandlungsprozesses. Entwickelnde, Betreibende und Nutzende gestalten dabei wechselseitig die Technologie – und reflektieren fortlaufend deren Wirkungen, Annahmen und Grenzen. In einer reflexiven Technikentwicklung werden soziale Kontexte und zwischen verschiedenen beteiligten und betroffenen Akteuren kontinuierlich in den Entwicklungsprozess zurückgeführt. Dadurch können Aushandlungsprozesse, Deutungshoheiten und Rollenzuschreibungen kritisch hinterfragt und Grundannahmen in der Gestaltung technischer Lösungen transparenter gemacht werden.

In diesem Sinne ermöglicht ein aktiv und reflexiv gestaltetes Wechselverhältnis zwischen allen beteiligten Akteuren – Netzbetreibern, Energieversorgern, Entwicklern und Endkunden – die Entwicklung einer vertrauenswürdigeren und an tatsächliche Bedürfnisse angepassten Technologie.

Fazit: Vertrauen als Voraussetzung der Energiewende

Digitalisierung kann die Energiewende entscheidend voranbringen – wenn sie von Vertrauen getragen wird. Dieses Vertrauen entsteht nicht automatisch durch technische Sicherheit, sondern durch nachvollziehbare Prozesse, faire Beteiligung und transparente Entscheidungslogik. Im Zusammenspiel von menschlichem und maschinellem Vertrauen, zwischen Automatisierung und Mitgestaltung, liegt der Schlüssel für ein Energiesystem der Zukunft, das nicht nur effizient, sondern auch gesellschaftlich legitimiert und resilient ist. Nur wenn Menschen sich auf digitale Systeme verlassen können, dann wird aus technologischer Innovation echte Transformation.

Autoren | Auteurs

Prof. Dr.-Ing. **Astrid Niesse** ist Professorin für Digitalisierte Energiesysteme und Mitglied im Vorstand des OFFIS Institut für Informatik | est professeure en systèmes énergétiques digitalisés et membre du comité de l'OFFIS - Institut pour les technologies de l'information.
→ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
DE-26129 Oldenburg
→ astrid.niesse@uni-oldenburg.de

Prof. Dr. **Jannika Mattes** ist Professorin für Organisation und Innovation | est professeure en organisation et innovation.
→ jannika.mattes@uni-oldenburg.de

Prof. Dr. **Sebastian Lehnhoff** ist Professor für Energieinformatik und Vorstandssprecher des OFFIS Institut für Informatik | est professeur en informatique énergétique et porte-parole du comité de l'OFFIS - Institut pour les technologies de l'information.
→ sebastian.lehnhoff@uni-oldenburg.de

Diese Veröffentlichung ist im Rahmen des Forschungsprogramms «Transformation des Energiesystems Niedersachsen» (TEN.efzn) am Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn) entstanden. Das Projekt wurde mit Mitteln aus zukunft.niedersachsen, dem gemeinsamen Wissenschaftsförderprogramm des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur und der Volkswagen-Stiftung gefördert.

Cette publication a été réalisée dans le cadre du programme de recherche « Transformation du système énergétique de Basse-Saxe » (TEN.efzn) au Centre de recherche sur l'énergie de Basse-Saxe (efzn). Le projet a été financé par zukunft.niedersachsen, le programme conjoint de financement scientifique du ministère des Sciences et de la Culture de Basse-Saxe et de la Fondation Volkswagen.

voire qu'ils acceptent certaines restrictions en matière de confort. Ainsi, des processus énergivores doivent être décalés dans le temps pour des raisons de stabilité du réseau ou d'ordre économique. Parallèlement, les constellations sociales évoluent, par exemple grâce à de nouvelles possibilités de coopération telles que les communautés électriques ou le partage d'énergie (energy sharing).

Mais comment concevoir des systèmes digitalisés de telle sorte que les personnes les adoptent réellement? C'est là qu'intervient le concept de développement technologique réflexif. Celui-ci ne considère pas la technologie comme un produit fini, mais comme faisant partie d'un processus de négociation sociale. Les développeurs, les exploitants et les utilisateurs façonnent la technologie de manière réciproque, et réfléchissent en permanence à ses effets, ses hypothèses et ses limites. Dans une approche réflexive, les contextes sociaux et les interactions entre les différents acteurs concernés sont intégrés en continu dans le processus de conception. Cela permet de questionner de manière critique les processus de négociation, les interprétations dominantes et les rôles attribués, tout en rendant plus transparentes les hypothèses de base sur lesquelles repose la conception des solutions techniques.

Ainsi, une interaction active et réflexive entre tous les acteurs impliqués – gestionnaires de réseau, fournisseurs d'énergie, développeurs et clients finaux – permet de concevoir des technologies plus dignes de confiance et mieux adaptées aux besoins réels des utilisateurs.

Conclusion: la confiance, condition préalable à la transition énergétique

La digitalisation peut faire avancer de manière décisive la transition énergétique, à condition qu'elle repose sur la confiance. Cette confiance ne découle pas automatiquement de la sécurité technique, mais de processus compréhensibles, d'une participation équitable et d'une logique décisionnelle transparente. La clé d'un système énergétique du futur non seulement efficace, mais aussi socialement légitime et résilient, réside dans l'interaction entre la confiance humaine et la confiance dans les machines, entre l'automatisation et la participation. Ce n'est que lorsque les individus pourront compter sur les systèmes numériques que l'innovation technologique deviendra une véritable transformation.