

## Introduction

Été 2022, un enchaînement de phénomènes climatiques extrêmes, hors normes, rythme la saison sur toute la planète Terre ; les météorologistes eux-mêmes sont surpris, car aucun modèle météo n'était jusqu'ici capable de les imaginer ou de les anticiper. Un coupable : le changement climatique causé par une activité humaine effrénée, énergivore, vorace en matière première, écocide induisant la sixième extinction de masse réduisant dramatiquement la biodiversité.

Début 2020, un vortex de fumées humides de 1 000 kilomètres de diamètre a persisté pendant 13 semaines, parcourant 66 000 km dans l'hémisphère Sud. Ce spécimen d'un nouveau genre a été lui-même engendré par un autre monstre : un mégafeu qui ravagea en Australie 5,8 millions d'hectares de bush après 35 mois d'une sécheresse exacerbée par le réchauffement global. En rencontrant les masses d'air fraîches et humides, ces panaches ultra-convectifs ont alors formé une trentaine d'immenses nuages appelés « pyrocumulonimbus ». Ces intrus ont perturbé la dynamique et la chimie des très hautes altitudes (35 km), renforçant les vents autour de l'Antarctique de l'ordre de 40 km/h et détruisant 20 % de l'ozone ; le trou dans la couche d'ozone<sup>1</sup> a été particulièrement large en 2020 et 2021 [NOU 22].

Une nuée mortelle de moiteur torride s'empare parfois des régions situées à mi-chemin d'une zone désertique et d'une mer brûlante en pleine évaporation, ou d'une zone d'irrigation en surchauffe. Cette chaleur saturée d'humidité à 35 °C empêche toute évacuation de la chaleur d'un organisme humain, et conduit en moins de six

---

1. La couche d'ozone située entre 20 et 30 km d'altitude filtre les rayons UV-B solaires qui sont les plus dangereux. Ils ont un effet néfaste sur tous les organismes vivants, terrestres et aquatiques, car ils altèrent l'ADN des cellules. Cette couche protège donc les organismes vivants, mais l'ozone est aussi un gaz à effet de serre ; son augmentation près du sol va augmenter l'effet de serre contribuant à un changement climatique accru. La concentration moyenne d'ozone augmente avec la consommation de combustibles fossiles, et avec la quantité de feux de forêt.

heures à une mort certaine, mais l'issue pourrait être fatale dès 31 °C. Ce phénomène, accentué par le réchauffement climatique, conduit à une augmentation de la chaleur latente<sup>2</sup> dans l'atmosphère, et concerne plus particulièrement les zones côtières subtropicales, l'Inde et le Pakistan, mais pourrait aussi concerner à l'avenir le Midwest américain, l'Asie du Sud-Est et les bords de la Méditerranée. Cette chaleur humide peut affecter la survie des animaux à sang chaud et des humains pendant les canicules extrêmes [NOU 22].

La fréquence et l'intensité des méga-ouragans sont en croissance, profitant d'un océan de plus en plus chaud grâce au réchauffement climatique ; océan qui fournit le carburant de ces ouragans. La fréquence des cyclones de catégorie 3 et plus (plus de 180 km/h de vent) devrait doubler d'ici à 2050 dans la plupart des régions du monde, avec une vitesse maximale des vents qui pourrait progresser de plus de 20 % par endroit [NOU 22].

À 3 000 mètres d'altitude et sur environ 2 km d'épaisseur se déploient des fleuves atmosphériques. Lorsqu'ils rencontrent une montagne ou un front d'air ascendant, toute cette vapeur d'eau s'élève, se refroidit, se condense... et déclenche un déluge. Ces phénomènes, qui naissent au-dessus des océans tropicaux, menacent bon nombre de régions côtières dans le monde, et jouent un rôle dans les inondations qui frappent l'Europe de l'Ouest, notamment en Grande-Bretagne et dans la péninsule Ibérique. Le réchauffement climatique aggrave ce phénomène, car les lois de la thermodynamique impliquent qu'une hausse de 1 °C permet à l'air de contenir 7 % de vapeur d'eau en plus [NOU 22].

Les périodes de sécheresse s'accroissent, mais un nouveau phénomène prend de l'ampleur : les sécheresses éclaircies qui font disparaître l'eau d'un territoire si vite (en cinq jours seulement) que personne n'a le temps de réagir. L'intensification de ce phénomène, qui a touché les grandes plaines américaines, mais pourrait aussi concerner le bassin amazonien et le Sud-Est asiatique, semble surtout causé par un couplage redoutable entre l'aridité du sol et de l'atmosphère : la faible humidité dans la terre et la végétation réduit les flux d'évaporation dans l'air ; or, cet air plus sec diminue les chances de précipitations ; une rétroaction qui se renforce avec le réchauffement climatique [NOU 22].

Tous ces phénomènes s'ajoutent à une fonte accélérée des glaciers et de la banquise, augmentant le niveau des océans jusqu'à 3 mètres en 2100 suivant les scénarios,

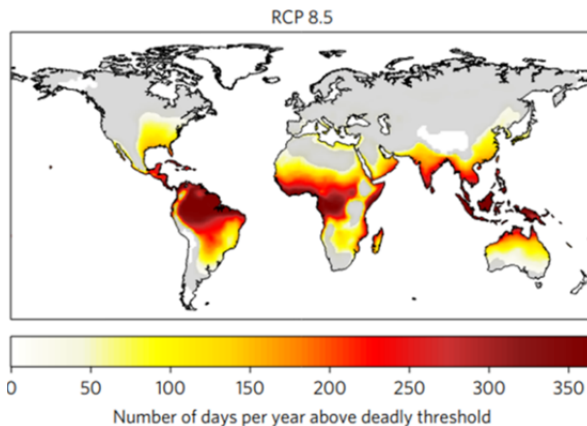
---

2. La chaleur latente provoque le changement d'état d'une matière sans modifier sa température (exemple de l'eau liquide qui se transforme en vapeur à 100 °C). Lorsque la chaleur latente est absorbée ou libérée, elle produit une instabilité dans l'atmosphère, ce qui peut entraîner des phénomènes météorologiques violents. Le changement de chaleur latente modifie la température des objets lorsqu'ils entrent en contact avec de l'air plus chaud ou plus froid. Voir : [www.greelane.com/fr/science-technologie-math%C3%A9matiques/science-4132464](http://www.greelane.com/fr/science-technologie-math%C3%A9matiques/science-4132464).

mettant en danger les populations vivant près des côtes. Par ailleurs, le réchauffement climatique modifie la chimie des océans, dont leur acidification, affectant la vie marine comme cela est déjà visible pour les coraux.

« Sans mesures d'adaptation, et dans le cadre d'un scénario de réchauffement planétaire de 3 °C d'ici 2100 (par rapport à l'ère préindustrielle située avant 1750-1800), 90 000 Européens pourraient mourir par suite des canicules chaque année », d'après l'Agence européenne de l'environnement (AEE). Cependant, si ce réchauffement est limité au 1,5 °C visé par l'accord de Paris (COP 21), le nombre de décès sera divisé par 3. L'AEE souligne également que le changement climatique favorise l'émergence et la transmission de maladies infectieuses (entre autres grâce aux moustiques vecteurs du paludisme et de la dengue).

Mais même si les objectifs de l'accord de Paris sont respectés, les régions tropicales pourraient connaître des canicules dangereuses plusieurs mois par an, avec des températures insupportables pour le corps humain. 39,4 °C est considéré comme une température dangereuse pour le corps humain, et 51 °C comme extrêmement dangereuse. La figure I.1 montre le nombre de jours où la température dépassera le seuil de mortalité dans différentes régions de la planète en 2100 dans le scénario RCP 8.5, qui simule une situation *business as usual*, c'est-à-dire sans changement de nos modes de vie actuels. En 2050, la température moyenne de la planète aurait augmenté d'environ 2 °C et en 2100 d'environ 4 °C. Dans ce scénario, les émissions de gaz à effet de serre ne se stabiliseraient qu'en 2250 ! De quoi encourager des déplacements de populations avec tous les déséquilibres géopolitiques et la précarité induits par des migrations non maîtrisées.



**Figure I.1.** Nombre de jours où la température dépasserait le seuil de mortalité dans différentes régions de la planète en 2100 dans le scénario RCP 8.5, qui simule une situation « *business as usual* » (source : 5<sup>e</sup> rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) paru en 2014).

Selon l'Institut français de la santé et de la recherche médicale (Inserm), chaque degré de température en plus augmente le risque de suicide, risque qui sera dès lors accru par le réchauffement climatique.

Donc, lorsque la planète se réchauffe, ce sont nos corps, nos intellects et nos institutions qui sont mis sous pression. Et la liste des effets néfastes induits par le réchauffement climatique peut encore être longue, tous ces effets n'étant pas encore nécessairement connus. De plus, une action ou un événement *a priori* positif pour limiter les émissions de gaz à effet de serre peut induire en réalité un effet négatif ! Voici un exemple : en 2020, alors que les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> ont baissé sous l'effet de la Covid-19, la concentration de méthane, autre puissant gaz à effet de serre, a bondi dans l'atmosphère. Bien qu'ayant une durée de vie courte – une dizaine d'années seulement dans l'atmosphère –, il est le deuxième gaz à effet de serre en matière d'abondance dans l'atmosphère, derrière le CO<sub>2</sub>, et a un potentiel de réchauffement bien plus élevé que ce dernier ; il est responsable de 20 % du réchauffement climatique. Si l'origine des émissions de méthane sont liées aux énergies fossiles, à l'agriculture (les pets et rots des ruminants principalement), le traitement des déchets, les feux de forêt, etc., une fois émis dans l'atmosphère, le méthane sera en grande partie oxydé par des réactions photochimiques. En particulier grâce aux radicaux hydroxyles (OH), présents en quantité infinitésimale dans l'atmosphère, mais qui y assurent, malgré tout, 85 % de la destruction du méthane. Or, cette espèce chimique est produite par les émissions de polluants, en particulier les oxydes d'azote (Nox). Ces Nox, qui sont grandement responsables de la pollution de l'air des grandes métropoles, sont majoritairement émis par les véhicules à moteur à combustion. Moteurs qui ont justement beaucoup moins tourné en 2020 du fait de la pandémie [POU 22].

« La Terre est beaucoup plus puissante qu'on l'imaginait, l'espèce humaine est beaucoup plus insignifiante que prévu », constate l'économiste américain Jérémy Rifkin [RIF 22]. Insignifiant, vulnérable, mais avec quelle capacité d'adaptation et de résilience<sup>3</sup> face à des changements rapides et d'ampleur ?

« Chaque être vivant possède une structure qui lui assure sa cohérence et une sorte d'unité fonctionnelle, gages d'une "robustesse" qui lui permet de conserver une certaine invariance dans le temps », expliquent Vincent Grégoire-Delory et Thierry Magnin :

« La robustesse d'un vivant définit ainsi son aptitude à se maintenir devant les perturbations liées à son environnement. Mais en même temps, chaque être vivant se laisse influencer par des effets d'environnement

---

3. Le dictionnaire *Le Robert* propose plusieurs définitions. En psychologie, la résilience est la capacité à surmonter les chocs traumatiques. En écologie, c'est la capacité d'un écosystème, d'une espèce ou d'un individu à retrouver un fonctionnement ou un développement normal après avoir subi une perturbation écologique.

externe, grâce à des “structures d’accueil” de ces influences externes (vulnérabilité). Plasticité [du cerveau et globalement du vivant] et adaptabilité sont ainsi deux caractéristiques essentielles du vivant. En ce sens, on peut appliquer l’adjectif “vulnérable” au vivant malléable [vulnérabilité qui est un espace essentiel à sa croissance] indépendamment de toute fragilité liée à une maladie ou une déficience. Cependant, cette tension entre robustesse et vulnérabilité peut favoriser une certaine “fragilité” du vivant. » [GRE 22]

Le vivant a donc une capacité d’adaptation et de résilience, toutefois mise à rude épreuve, et qui peut être fragilisée par la rapidité et l’ampleur du changement. Les plus pessimistes parlent alors d’effondrement (ce qui peut qualifier les espèces en voie de disparition), mais une réaction positive d’adaptation et de résilience nous amène à imaginer et à engager des transitions d’ampleur (énergétique, sociétale, agricole, numérique, etc.), mais aussi des révolutions (pacifistes de nos modes de vie, par exemple), et la reconstruction d’écosystèmes détruits par l’homme et mis à mal par le réchauffement climatique.

Le monde et la planète Terre connaissent donc une grave crise écologique, induite par une consommation énergétique et matérielle effrénée par l’humanité, impactant le climat et la biodiversité de façon irréversible. La consommation d’énergie fossile depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle a indéniablement permis le développement de l’industrie, des transports et du niveau de vie, en particulier au sein des pays les plus industrialisés, mais elle a aussi contribué à l’accroissement des gaz à effet de serre (GES) dans l’atmosphère, engendrant le réchauffement du climat de notre planète. Ce phénomène se poursuit et si les émissions de ces gaz ne sont pas rapidement et drastiquement réduites, le réchauffement aura des impacts sur la planète et nos modes de vie qui deviendront de plus en plus conséquents et difficiles à vivre. Les énergies fossiles constituent la première source d’émission de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane), mais elle n’est pas la seule.

Les enjeux énergétiques et sociétaux sont liés, l’énergie occupant une place très importante dans nos modes de vie, que ce soit l’énergie directement consommée (pour se chauffer, s’éclairer, se nourrir, se déplacer, faire fonctionner tous nos appareils électriques et numériques et autres), l’énergie nécessaire pour réaliser les produits que nous consommons (pour extraire et transformer les matériaux, pour les cultures, l’élevage, etc.), mais aussi *via* l’impact de nos modes de vie qui, par exemple, engendrent une déforestation qui réduit les puits naturels de CO<sub>2</sub>, favorisant son stockage dans l’atmosphère.

Les bâtiments dans lesquels nous vivons, nous travaillons, nous réalisons nos achats ou encore ceux destinés aux loisirs, au sport, sont les premiers émetteurs de CO<sub>2</sub>.

Les technologies mises en œuvre pour les construire et les exploiter jouent un rôle important dans l'ampleur de ces émissions carbonées, mais la façon dont on y habite et dont on en fait usage contribue également à ces émissions. Ces bâtiments s'équipent de dispositifs permettant de mieux connaître et maîtriser l'énergie, ils peuvent devenir producteurs d'énergie et la stocker, grâce aux nouveaux matériaux utilisés pour construire ces bâtiments, mais aussi de plus en plus grâce aux nouvelles technologies de l'énergie et du numérique, tout en veillant au confort de ses occupants. Ils deviennent des bâtiments intelligents ou *smart buildings*.

Ainsi, les bâtiments sont amenés à devenir intelligents, tout comme les réseaux d'énergie (*smart grids*), avec une implication accrue des usagers. Ces bâtiments sont en interaction avec les réseaux d'énergie, intégrant de nouvelles pratiques d'autoproduction et d'autoconsommation d'énergie. Tous ces systèmes sont interconnectés par des systèmes d'information induisant une convergence Internet de l'énergie entre smart buildings, smart grids, l'Internet des objets et des personnes.

Les bâtiments et plus largement l'habitat associés aux réseaux d'énergie, devenant plus respectueux de l'environnement et faibles émetteurs de carbone, constituent les briques d'une ville de demain. Si l'on y associe la qualité du cadre de vie avec le retour de la nature en ville (voire d'une agriculture urbaine), les transports faiblement carbonés comme les transports en commun (les transports constituent un autre émetteur important de CO<sub>2</sub>), des espaces et organisations favorisant le vivre-ensemble, la démocratisation des moyens d'information et de prise de décisions (démocraties participatives) permettant aux habitants d'être partenaires de la ville et non plus uniquement consommateurs, on obtient les ingrédients d'une ville intelligente ou *smart city*. Cette évolution des villes est importante, car si les villes occupent aujourd'hui 2 % de la surface du globe, elles abritent 50 % de la population mondiale, consomment 75 % de l'énergie produite et émettent 80 % des émissions de CO<sub>2</sub> [ROB 19, ROB 22]. L'enjeu pour que les villes deviennent plus durables, neutres en carbone, résilientes, tout en étant plus durables, est dès lors considérable.

Pour l'économiste français Gaël Giraud :

« La France de demain sera maillée de petits centres urbains dont tous les bâtiments produiront eux-mêmes de l'énergie partagée dans des smart grids, seront entourés de polycultures bios, tissés de circuits courts, reliés par du rail. Ce sera la fin de la grande distribution, du zoning, des emplacements d'entrepôts et des supermarchés. » [VIO 20]

Smart buildings, smart grids, smart cities, des concepts avec beaucoup de technologies prometteuses pour lutter contre le changement climatique, surtout s'ils sont

habités et utilisés par des *smart users*<sup>4</sup> [ROB 22] ? Nous pourrions tout optimiser avec des algorithmes adéquats, pourquoi pas de l'intelligence artificielle, qui avec de très nombreuses données (big data) [GIO 21], pourront donner des consignes à toutes les composantes *smarts* du système et ainsi atteindre les comportements optimaux (des matériels et des humains) pour sauver la planète ! Voilà un rêve de *Big Brother* que les technosciences pourraient prétendre concrétiser sous peu ! Si les solutions technologiques feront partie des solutions d'avenir, il est de plus en plus évident que ces solutions ne seront pas optimales, voire auront des effets négatifs pour la planète, si la société ne se les approprie pas ; appropriation nécessaire pour qu'elle les fasse évoluer, les enrichisse de sa créativité, et les fasse sienne. Seulement ainsi ces solutions pourront être désirables et économiquement viables, la rationalité humaine n'étant pas celle de la machine, les acceptabilités individuelles et sociales n'ayant rien d'automatique [ROB 19, ROB 22]. Nous sommes bien au croisement des technosciences et des enjeux sociétaux.

Dès lors, pour réussir la transition énergétique et sociétale, il faut amener les différentes disciplines scientifiques à travailler ensemble, afin de développer les approches interdisciplinaires entre sciences humaines et sociales et sciences de l'ingénieur, indispensables à une transition réussie qui appartienne à tous.

Le présent ouvrage, après avoir réalisé un point sur la nécessaire transition, propose des approches interdisciplinaires pour amener les bâtiments, les réseaux d'énergie, leurs usagers et acteurs à contribuer à la transition énergétique et sociétale. Il traite :

- de l'importance d'appréhender ensemble production (systèmes techniques) et consommation d'énergie (usagers) pour atteindre les objectifs de sobriété énergétique, c'est-à-dire questionner et concevoir de manière corrélative techniques, usages et imaginaires dans la mise en œuvre des smart buildings et des smart grids ;
- de l'importance de la prévision de la production et de la consommation énergétiques ;
- de la modélisation de l'implication des acteurs dans un smart grid électrique local en vue de sa supervision énergétique ;
- de l'autoconsommation au sein d'une communauté énergétique renouvelable locale ;

---

4. *Smart users* ou *usagers intelligents*, objet de l'ouvrage [ROB 22]. D'après le dictionnaire *Le Robert* est intelligent celui qui a la faculté de connaître et de comprendre, qui est, à un degré variable, doué d'intelligence. D'après Wikipédia, l'intelligence est l'ensemble des processus retrouvés dans des systèmes, plus ou moins complexes, vivants ou non, qui permettent de comprendre, d'apprendre ou de s'adapter à des situations nouvelles. En anglais, *smart* signifie intelligent, astucieux (dictionnaire de Cambridge).

- des potentialités des smart buildings, notamment pour prendre en compte le confort des usagers, tout en augmentant leur efficacité énergétique ;
- de l'apport de démonstrateurs à échelle réelle, et de l'acceptabilité et l'appropriation par les usagers des potentialités d'effacement électrique.

L'interdisciplinarité de cet ouvrage est assurée par les diverses expertises des auteurs : ingénieurs et chercheurs dans le domaine des réseaux électriques et de leurs croisements avec les bâtiments (Benoît Robyns, Dhaker Abbes, Benoit Durillon, Christophe Saudemont), sociologue (Hervé Barry) et socio-anthropologue (Laure Dobigny). Il fait suite à l'ouvrage *Des usagers intelligents pour la transition énergétique et sociétale* [ROB 22], mais peut être lu indépendamment.

Après avoir résumé les enjeux climatiques, le chapitre 1 présente quatre scénarios types imaginés par l'Ademe (Agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Ces récits proposent de nombreuses pistes de solution technologiquement plus ou moins matures, et socialement plus ou moins acceptables, souhaitables ou désirables, discutées dans la suite de ce chapitre. Y sont abordés la sobriété et la prospérité (la meilleure énergie étant celle que l'on ne consomme pas !), le lien entre transition écologique et spiritualité, des questions éthiques et enjeux politiques, des chercheurs en bifurcation, pour en arriver à introduire les réseaux d'énergie intelligents, les bâtiments plus intelligents dans un habitat désirable, ainsi que du croisement entre réseaux d'énergie et bâtiments. Les apports méthodologiques de l'ouvrage sont résumés en fin de chapitre. Les développements présentés sont positionnés par rapport aux scénarios 2050 de l'Ademe, ainsi qu'en termes de contribution aux objectifs de développement durable de l'ONU.

Dans le chapitre 2, Laure Dobigny, socio-anthropologue, discute les limites à la fois d'une approche centrée sur le changement technique (efficacité énergétique) et d'une approche centrée uniquement sur le changement des pratiques. La démonstration du lien intrinsèque entre systèmes techniques et usages implique de penser ensemble les techniques et leurs usages, c'est-à-dire que l'appropriation des techniques, par l'utilisateur, joue un rôle central sur les usages et donc l'atteinte de pratiques de sobriété. Elle s'interroge sur « l'efficacité » du smart (smart city, smart grid, smart building) à relever les défis environnementaux, car tous ces développements techniques reposent sur le même imaginaire d'une distanciation toujours plus grande entre les systèmes techniques et leurs usagers. Fort de ce constat, dans les chapitres 4 à 8, des tentatives d'une meilleure prise en compte de l'utilisateur, *via* son profil d'acteur et/ou en lui permettant d'agir sur son environnement en interagissant avec la technologie, sont proposées dans le cadre des réseaux d'énergie et des bâtiments devenant plus intelligents.

Le chapitre 3 montre l'importance de prédire les productions et consommations d'énergie, en particulier les énergies renouvelables intermittentes telles que le solaire et l'éolien. Des méthodes de prévision destinées à prédire la production photovoltaïque



par images satellites, par caméra et par réseaux de neurones artificiels sont développées. Les réseaux de neurones artificiels sont également mis en œuvre pour prédire la consommation de bâtiments tertiaires. Ces méthodes sont testées sur le démonstrateur smart grid de l'Université catholique de Lille [ROB 22]. Ces prévisions de production et de consommation permettent de mieux valoriser les énergies renouvelables autoproduites en maximisant leur autoconsommation, par exemple en modulant la consommation (en la rendant flexible) pour la synchroniser sur les moyens de productions lorsque cela est possible. Ces prévisions permettent également une plus grande flexibilité vis-à-vis du réseau public de distribution d'électricité en vue de limiter d'éventuelles contraintes sur ce réseau, de favoriser la consommation d'une énergie décarbonnée et moins coûteuse.

Les smart grids déploieront réellement leur potentiel d'innovation en favorisant les interactions entre les différents acteurs du système électrique (producteurs, consommateurs, stockeurs, gestionnaires de réseau), eux-mêmes devenant des acteurs « électriquement » plus intelligents. Ces acteurs ont des profils de consommation et/ou de production très différents, et des objectifs et/ou contraintes économiques et sociétaux très variables. De nouveaux jeux d'acteurs peuvent dès lors apparaître, permettant de viser de nouveaux modèles économiques, mais aussi de répondre aux enjeux énergétiques et climatiques en favorisant le développement des énergies renouvelables (EnR). Un enjeu de cette évolution est que tous les acteurs y soient gagnants, sans oublier les acteurs en précarité énergétique [ROB 19].

L'appréhension et l'intégration des comportements énergétiques dans un réseau étant parmi les principaux challenges de la question énergétique, cette question sera abordée dans le chapitre 4 sous l'angle de l'interdisciplinarité. C'est au croisement du génie électrique, de la micro-économie et de la sociologie que se situe ce travail exploratoire, avec comme finalité une gestion de réseau qui soit efficace en assurant le respect des sensibilités de chaque partie prenante de ces nouveaux smart grids. Ce chapitre tente de répondre aux questions suivantes dans l'objectif d'apporter de la flexibilité énergétique au système électrique dans un contexte résidentiel : quels sont les profils d'implication d'acteurs du réseau ? Comment modéliser ces profils ? Comment utiliser ces profils pour la gestion de l'énergie ?

Sur la base des profils d'acteurs résidentiels identifiés et modélisés dans le chapitre 4 (économe, écosensible, technophiles, indifférents-opportunistes modérés, désengagés), le chapitre 5 propose une réponse à la question : comment utiliser ces profils pour la gestion de l'énergie ? Une stratégie de supervision énergétique d'un smart grid résidentiel local, dans un objectif global d'apporter de la flexibilité énergétique au système électrique tout en intégrant l'implication des acteurs est développée en deux temps : une étape de supervision prédictive la veille pour le lendemain, et une étape de supervision en temps réel. Le jeu des acteurs est modélisé grâce à la théorie des

jeux largement utilisée en économie. L'optimisation des objectifs des acteurs (gain économique, énergie renouvelable, confort) fait appel à la programmation dynamique. L'ajustement en temps réel est réalisé grâce à une étape de supervision basée sur la logique floue construite suivant une méthodologie développée par le Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille (L2EP) [ROB 15, ROB 19]. Cette supervision est testée et analysée au moyen de simulations numériques.

Afin de maximiser l'autoconsommation au sein d'une communauté d'énergie renouvelable locale, le chapitre 6 propose un modèle d'échange énergétique technico-économique au moyen d'une approche combinant la théorie des jeux, l'algorithme d'optimisation ADMM (*Alternating Direction Method of Multipliers*) et une *blockchain* (distribuée, sécurisée et décentralisée). Les acteurs s'échangent l'énergie sans intermédiation d'une manière décentralisée. Les échanges sont automatisés en fonction de la production photovoltaïque (PV) et de la consommation *via* des *smart contracts*, avec prise en compte du coût, de l'autoconsommation PV, et du confort des acteurs. Des acteurs très différenciés sont pris en compte : consommateurs permanents, consommateurs de passage tel qu'un véhicule électrique (VE), consommateur/producteur, producteur, stockeur, gestionnaire du réseau public de distribution, etc. À travers des fonctions d'utilités inspirées des développements présentés dans le chapitre 4, les profils d'acteurs sont pris en compte. Le réseau électrique du démonstrateur de l'îlot historique de l'Université catholique de Lille, développé à travers son programme de transition énergétique et sociétale Live TREE [ROB 22], sert de cas d'étude pour l'application des méthodes de gestion énergétique développées dans ce chapitre. Ce réseau relie quatre bâtiments tertiaires, deux centrales PV, un système de stockage par batterie et six points de recharge pour véhicules électriques. Un exemple de mise en œuvre de la gestion d'échanges énergétiques *via* la technologie blockchain est développé. Les consommations énergétiques de différentes technologies blockchain sont évaluées et comparées avec une gestion centralisée plus classique.

Dans le chapitre 7, le concept de smart building est défini, en illustrant les services qu'il peut offrir grâce aux nombreuses données qu'il peut récolter et gérer, plus particulièrement dans le cas de bâtiments tertiaires. Ces données numériques, gérées par exemple au moyen d'un jumeau numérique de type BIM (*Building Information Modeling*), peuvent offrir de nouveaux services aux usagers, aux réseaux d'énergie auxquels le bâtiment est connecté (les bâtiments deviennent des nœuds d'un réseau d'énergie intelligent), et contribuer à mieux insérer ce bâtiment dans son environnement. Plusieurs exemples d'utilisation des données dans la gestion d'un bâtiment sont présentés. Il s'agit de l'optimisation énergétique dynamique d'un bâtiment à partir de données météo et potentiellement de données fournies par une maquette BIM, en tenant compte des occupations de salle et du confort des usagers. L'intérêt de gérer la qualité de l'air intérieur (QAI) afin d'assurer le confort des usagers est développée dans un deuxième temps. Enfin, l'apport de la technologie blockchain au sein de

smart buildings est illustré par deux exemples. Mais si déploiement du numérique offre de nombreuses nouvelles opportunités pour le développement, la gestion et la valorisation des bâtiments, il ne doit pas faire oublier l'impact environnemental de celui-ci qui se doit d'être drastiquement réduit à l'avenir. Pour expliquer cette évolution vers des bâtiments plus vertueux sur le plan environnemental, deux exemples de bâtiments tertiaires, l'un rénové, l'autre construit, de l'Université catholique de Lille, sont présentés et comparés. L'utilisateur a un rôle à jouer au sein d'un bâtiment pour contribuer aux performances environnementales de celui-ci tout en veillant à son confort. Cette dimension est illustrée par les résultats obtenus par une approche socio-technique de gestion d'un bâtiment qui n'a pas été conçu au départ comme « intelligent ». Le bâtiment sobre et l'approche *low-tech* sont également des voies importantes pour réduire l'impact climatique du bâtiment. Le cas du bâtiment résidentiel est particulièrement évoqué pour illustrer l'intérêt de ces approches.

La mise en œuvre de la transition énergétique et sociétale passera par l'expérimentation à échelle réelle de nombreuses solutions technologiques, économiques, d'organisations sociétales locales, etc., en acceptant les essais, les erreurs et les ajustements. Il s'agit de valider la viabilité des technologies et leur efficacité et leur impact sur l'environnement, l'acceptation sociale qui n'a rien d'automatique, de trouver de nouveaux modèles économiques, de concevoir de nouveaux cadres juridiques, etc.

Le chapitre 8 présente une démarche de développement de démonstrateurs de nouvelles solutions permettant de mieux maîtriser la consommation et la production renouvelable de l'énergie électrique, *via* l'autoproduction et l'autoconsommation d'énergie, la mobilité électrique et la flexibilité de charges électriques de bâtiments. L'approche est à la fois technologique et sociologique. Ainsi, dans le cadre de l'évaluation de potentiels d'effacement électrique dans le site démonstrateur, les possibilités d'effacement étant apportées par un contexte sociotechnique, sont d'abord évoquées les évolutions de la philosophie prévalant à la conception des bâtiments ; cette philosophie fixe les responsabilités respectives des facteurs techniques et humains dans le bon fonctionnement énergétique d'un bâtiment. Ensuite, le potentiel d'effacement dans un contexte de bâtiment tertiaire est abordé par une approche sociotechnique en traitant de l'effacement de ballons d'eau chaude et de la charge de véhicules électriques.

La majorité des travaux présentés dans cet ouvrage (chapitres 3 à 8) ont été réalisés dans le cadre de la chaire industrielle de recherche *Smart Buildings as nodes of Smart Grids (SBnodesSG)* portés par l'école d'ingénieurs Junia avec neuf entreprises et le soutien financier de la Métropole européenne de Lille (MEL), dans le cadre du programme de transition énergétique et sociétale Live TREE<sup>5</sup> de l'Université catholique de Lille [ROB 22].

---

5. [www.livetree.fr](http://www.livetree.fr).

## Bibliographie

- [GIO 21] GIORGINI P., MAGNIN T., *Vers une civilisation de l'algorithme ? Un regard chrétien sur un défi éthique*, Bayard, Paris, 2021.
- [GRE 22] GREGOIRE-DELORY V., MAGNIN T. « L'humain troublé par sa vulnérabilité : exemple en sciences et technologies du vivant », *MSR*, p. 41-54, 2022.
- [NOU 22] NOUYRIGAT V., « Méga phénomènes climatiques. Ce qui nous attend. », *epsilon*, n° 17, p. 43-57, 2022.
- [POU 22] POULIQUEN F., « Climat : Pourquoi donc la concentration de méthane dans l'atmosphère a bondi en 2020 ? », *20 minutes*, 2022.
- [RIF 22] RIFKIN J., BOUCHER Y., « La terre est beaucoup plus puissante qu'on l'imaginait, l'espèce humaine est beaucoup plus insignifiante que prévu », *L'atlas éco de la Voix du Nord*, p. 1-11, 2022.
- [ROB 15] ROBYNS B., FRANCOIS B., DELILLE G., SAUDEMONT C., *Gestion et valorisation du stockage de l'énergie dans les réseaux électriques*, ISTE Editions, Londres, 2015.
- [ROB 19] ROBYNS B., DAVIGNY A., BARRY H., KAZMIERCZAKZ S., SAUDEMONT C., ABBES D., FRANCOIS B., *Stockage d'énergie électrique pour les bâtiments au sein de réseaux intelligents*, ISTE Editions, Londres, 2019.
- [ROB 22] ROBYNS B., LENGLET C., BARRY H., BOZZO-REY M., *Des usagers intelligents pour la transition énergétique et sociétale*, ISTE Editions, Londres, 2022.
- [VIO 20] VIO-DURY P., NOYON R., *Face aux chocs écologiques*, Marabout, Paris, 2020.