

Karim Beddiar
Fabien Imbault



CAMPUS
D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE FORMATION PROFESSIONNELLE

BLOCKCHAIN POUR L'ÉNERGIE

Applications et mise en œuvre dans la
ville du futur

DUNOD

Illustration de couverture : © Wenjie Dong/iStock

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements		d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	--	--

© Dunod, 2018
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-078631-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Pression démographique, métropolisation, vieillissement de la population, révolution des usages insufflée par les innovations technologiques et digitales... La ville connaît des mutations profondes qui redessinent les contours de l'expérience urbaine.

D'ici 2050, 67 % de la population mondiale vivra en ville. Face à cette métropolisation du monde, se dressent des défis tant sociaux qu'environnementaux, mais aussi de mobilité et de qualité de vie en ville. Pour concevoir des solutions urbaines durables et harmonieuses, je suis convaincu que la bonne échelle de réflexion et d'action est celle des quartiers – vecteurs de vie, de mixité et de dialogue.

Pour accompagner cette transformation inéluctable des villes, le domaine de l'énergie va devoir s'adapter à la demande des clients, plus exigeants en matière d'empreinte carbone. Il devra également suivre les évolutions attendues du marché, avec l'ouverture à la concurrence des réseaux d'énergie en Europe, concomitante avec l'arrivée de nouveaux systèmes de gestion décentralisés (smartgrids). Le temps est venu pour les aménageurs urbains de favoriser l'émergence d'un nouveau modèle énergétique urbain durable.

À ce titre, l'autoconsommation collective à la maille d'un quartier permettrait sans doute de développer un nouvel écosystème urbain qui réduirait la consommation de ces îlots urbains, encouragerait la production locale d'énergies renouvelables autoconsommées localement et abaisserait les coûts d'investissement dans les infrastructures de réseau.

Apparue dans le secteur financier, la technologie blockchain apparaît comme une solution adaptée à cet enjeu et ouvre vraisemblablement de nouvelles perspectives dans le domaine de l'énergie, susceptibles de générer d'importantes économies.

En effet, la blockchain offre une structure idéale pour organiser des transactions instantanées, sécurisées et transparentes au sein d'une communauté d'utilisateurs : elle constitue sans doute le tremplin qui manquait pour permettre l'essor des smartgrids d'énergie propre.

Même si la blockchain est annoncée par certains comme un changement aussi important que l'apparition des ordinateurs dans les entreprises dans les entreprises il y a 60 ans, il faut raison garder et valider, dès à présent, sa pertinence dans des expérimentations, afin de lever les freins inhérents à ces nouveaux modèles : technologiques, adaptations réglementaires et modèles économiques innovants.

Bouygues immobilier a toujours été un pionnier sur les technologies de rupture qui apportent de la valeur d'usage à nos clients : bâtiments à énergie positive (Green Office) avec 10 ans d'avance sur la réglementation, premier smartgrid (IssyGrid) opérationnel en France, premier promoteur à généraliser la maquette numérique (BIM) sur tous ses projets, premier promoteur à livrer la totalité de ses logements connectés...

C'est la raison pour laquelle nous avons lancé une expérimentation blockchain (décrite dans cet ouvrage), sur le territoire de la Métropole du Grand Lyon, au sein d'un consortium « Eureka Confluence », regroupant la collectivité territoriale, des industriels référents, des startups spécialisées et des consommateurs. Seuls, nous n'aurions pas cette même force d'innovation.

Je vous encourage à lire, comme moi, cet ouvrage qui apporte toutes les clés de compréhension sur la technologie de la blockchain, qui pourrait contribuer à faire émerger de nouveaux modèles économiques, donc de nouveaux emplois, en particulier dans le domaine de l'énergie urbaine, enjeu majeur des prochaines années.

Bonne lecture !

Christian Grellier,
directeur Innovation, Groupe Bouygues Immobilier

Remerciements

Cet ouvrage est le fruit de plusieurs mois de recherches sur un sujet émergent et complexe.

Nous tenons d'abord à remercier le CESI, en particulier sa direction générale et celle de la région Ouest pour leur soutien et leurs encouragements.

Merci à Monsieur Christian Grellier, directeur Innovation du Groupe Bouygues Immobilier d'avoir accepté de préfacer cet ouvrage.

Merci aux entreprises ayant accepté de nous fournir des études de cas et des illustrations, parmi elles : Bouygues immobilier, Solcrypto, Lutecium...

Enfin, nous souhaitons particulièrement remercier nos familles pour leur patience et leur compréhension.

Table des matières

Préface	III
Remerciements	V
Introduction générale	IX
1 Les principes et enjeux de la blockchain	1
1.1 Qu'est-ce que la blockchain ?	2
1.2 Défis et enjeux	9
1.3 Les acteurs et les logiques de l'écosystème blockchain	36
1.4 L'impact sur les business models	38
2 Les technologies blockchain	63
2.1 Les briques de base	63
2.2 Les <i>smart contracts</i> , les DApp et les Oracles	80
2.3 Confidentialité et sécurité des données	94
2.4 L'interopérabilité	99
2.5 Les frameworks	103
2.6 Les standards et la propriété intellectuelle	110
2.7 Limitations et perspectives	117
2.8 Conclusion	121
3 La blockchain et l'énergie dans la ville	123
3.1 Le green IT : la blockchain est-elle efficace d'un point de vue énergétique ?	123
3.2 La blockchain et la performance énergétique dans la ville	124
3.3 La blockchain et le BIM dans la construction	160
3.4 Conclusion	168

4 Études de cas	169
4.1 Le microgrid de Brooklyn	169
4.2 Le solarcoin, une cryptomonnaie pour l'énergie solaire	173
4.3 Écoquartier Confluence : un cas d'usage de la blockchain dans les microgrids	178
4.4 BIMCHAIN.io® : solution de confiance du BIM grâce à la blockchain	188
 Conclusion générale	 193
Abréviations	197
Glossaire	199
Bibliographie/webographie	209
Crédits iconographiques	219
Index	221

Introduction générale

Les grandes révolutions économiques interviennent toujours à la convergence de deux phénomènes : d'une part l'émergence d'une source d'énergie et d'autre part une révolution des modes de communication. Au ^{xix}^e siècle, la machine à vapeur a transformé l'imprimerie et la prolifération de l'imprimé a permis l'instauration de l'éducation publique. Au ^{xx}^e, l'électricité, le téléphone, la radio et la télévision ont donné naissance à la société de consommation. Mais *via* des systèmes très centralisés.

Aujourd'hui, avec Internet et les énergies renouvelables, nous vivons la troisième révolution industrielle théorisée par Jeremy Rifkin (2016). Cette révolution découle d'une convergence des technologies de la communication et des énergies renouvelables, qui permet celle de la communication distribuée (avec par exemple les technologies sans fil) et des formes d'énergies distribuées (comme les microcentrales en réseau qui fonctionnent grâce aux *smart grids*).

Le développement de l'Internet des objets dans le secteur énergétique se fait autour de trois axes impliquant chacun tout un écosystème industriel et technologique : (i) les objets physiques, (ii) la connectivité et (iii) le traitement des données.

La croissance de l'Internet des objets dans le secteur énergétique se fait au rythme soutenu des évolutions technologiques. La blockchain fait partie de ces grandes innovations de rupture majeure de notre époque. Elle est davantage sociétale que technologique et peut à cet égard être comparée à l'arrivée d'Internet, car elle permet de faire émerger des usages et des modèles économiques innovants, notamment dans le domaine énergétique. Mais cette technologie reste encore alambiquée et loin d'être adoptée par le public. Il convient par conséquent de la rendre plus accessible avant de mettre en exergue ses nombreux bénéfices. Et c'est l'ambition de cet ouvrage : dans ce domaine complexe et balbutiant, nous avons essayé de définir avec pédagogie les concepts de la blockchain et d'en expliquer le fonctionnement en ciblant l'application dans le domaine énergétique.

Ce travail pourra servir de point d'appui méthodologique pour les différents acteurs industriels qui s'intéressent de près ou de loin à la blockchain. Il servira également aux acteurs de la formation : enseignants, formateurs et étudiants.

Cet ouvrage est construit en quatre parties complémentaires :

- ▶ Le premier chapitre introduit la blockchain, définit les concepts et explicite son écosystème et ses domaines d'utilisation.
- ▶ Le deuxième chapitre, à visée technique et technologique, a pour objectif d'expliquer les briques de base de la blockchain (structures des données, outils cryptographiques, réseau...).
- ▶ Le troisième chapitre explore l'utilisation de la blockchain comme outil de gestion énergétique dans la construction. Il traite du développement de l'autoconsommation, de la décentralisation de l'énergie et du rôle de la blockchain dans la certification de la qualité de service d'exploitation des *microgrids* énergétiques. Plusieurs exemples sont dressés et commentés.
- ▶ Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la présentation de cas réels et d'applications de cette technologie. Ces études de cas sont décrites sous diverses facettes. Un zoom particulier est fait sur les volets énergétiques. L'objectif de ce dernier chapitre est de montrer l'étendue de l'utilisation de la blockchain sur le terrain et de donner un aperçu de la grande variété des projets et des enjeux actuels auxquels elle est liée.

La blockchain représente de nombreux avantages, parmi lesquels sécurité, transparence, disponibilité et déclinaison en multitude de cas d'usage. Elle permet d'optimiser les processus et de réduire les coûts de gestion pour mieux servir le client final.

Dans le domaine énergétique, on compte aujourd'hui plusieurs dizaines d'expérimentations dont la plus médiatique est celle d'échange d'électricité photovoltaïque entre habitants de President Street, à Brooklyn, aux États-Unis.

La blockchain représente un enjeu d'avenir, un objet d'innovation et de progrès formidable. C'est une technologie puissante au service du citoyen et de la ville de demain. C'est, en somme, une des solutions permettant de réussir la mutation numérique que traverse notre société.

Notre objectif dans cet ouvrage est de mieux vous faire comprendre cette révolution en cours. Nous ne traitons pas des aspects de programmation informatique relatifs à la blockchain, pour lesquels le lecteur pourra se reporter à d'autres

sources complémentaires. Nous avons pour ambition de donner aux potentiels utilisateurs de la blockchain une grille de lecture la plus complète possible leur permettant d'appréhender les concepts et la réalité d'utilisation de cette puissante technologie dans leur vie quotidienne et leurs projets en ciblant le volet énergétique.

Enfin, la blockchain étant une technologie balbutiante, la littérature, principalement anglophone, est riche avec des éclairages différents qui peuvent sembler parfois contradictoires sur certains aspects. Le lecteur souhaitant aller plus loin trouvera une bibliographique assez complète à la fin de cet ouvrage.