

Les plateformes numériques d'échange d'électricité

Par **Thomas CORTADE** et **Jean-Christophe POUDOU**

Université de Montpellier

Introduction

Dans le cadre de la transition énergétique qui s'est amorcée au niveau mondial, les technologies de communication et les réseaux intelligents ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine énergétique. Le déploiement de plateformes pair-à-pair (P2P) d'échange d'électricité pourrait constituer une voie novatrice participant à cette transition. Le principe de ces plateformes est simple : typiquement, un petit industriel ou un résidentiel membre d'un micro-réseau électrique (*microgrid*), et connecté au réseau traditionnel (*backup*), peut produire sa propre électricité à partir de ressources énergétiques renouvelables distribuées à petite échelle (éolien ou photovoltaïque). Il peut l'autoconsommer ou la revendre *via* une plateforme numérique spécialisée et interconnectée, qui sert de fait de place de marché en ligne. Il peut si besoin en acheter auprès des autres membres. Ces nouveaux consommateurs-producteurs sont appelés "*prosumers*" ou « prosommateurs », et, en participant à ces plateformes P2P, peuvent constituer une communauté de fait, plutôt numérique qu'énergétique⁽¹⁾.

Ces plateformes d'échange P2P, présentées dans une première partie, ont émergé aux États-Unis et aujourd'hui en Europe, plusieurs expériences ont été lancées avec comme caractéristiques communes la constitution d'un micro-réseau et des échanges sécurisés *via* des protocoles de *blockchain*.

Les problématiques économiques des plateformes énergétiques, exposées dans une deuxième partie, emboîtent celles des P2P numériques telles qu'eBay, Uber, Le Bon Coin ou encore Airbnb. Des éléments communs à l'ensemble de ces plateformes existent : un rôle d'intermédiation de la plateforme, un meilleur suivi des acheteurs et des vendeurs *via* la technologie, la mise en place de prix flexibles ou basés sur des mécanismes sophistiqués de tarification. Mais certains défis et spécificités apparaissent et sont présentés dans la troisième partie.

Expériences et projets

En Europe et aux États-Unis, plusieurs projets ou expériences de solutions informatiques pour des plateformes d'échange P2P ont été menés d'abord au niveau de quartiers ou d'ilots urbains. C'est le cas de Piclo (RU), Vanderbron (Pays-Bas), SonnenCommunity et Litchblick Swarm Energy (Allemagne), Yeloha, Mosaic (USA)⁽²⁾. Cependant, des projets de micro-réseaux interconnectés plus intégrés mêlent plateforme d'échanges et plateforme numérique, à l'image de TransActive Grid (États-Unis) et Electron (Royaume-Uni). Pour ceux-là, l'ensemble des échanges repose sur la

(1) Pour une vue d'ensemble des communautés énergétiques, voir Caramizaru et Uihlein (2020), et Abada *et al.* (2020a) pour une analyse de leur viabilité.

(2) Une revue complète des projets est donnée dans Zhang *et al.* (2017), et IRENA (2020).

confiance, d'une part, et sur la sécurisation des transactions, d'autre part, en utilisant des relations contractuelles décentralisées qu'autorisent des technologies comme la *blockchain*⁽³⁾.

L'exemple de Transactive Grid, Brooklyn

L'objectif initial du micro-réseau de Brooklyn, lancé en 2015, était, d'un côté, de simplifier le système de comptage électrique et de facturation, et, de l'autre, de se prémunir contre des coupures de la fourniture d'énergie provoquées par un réseau de distribution dégradé à la suite de l'ouragan Sandy en 2012. Ce micro-réseau est un système décentralisé communautaire, développé par TransActive Grid, en *joint-venture* avec Lo3 Energy et ConsenSys.

Historique et objectifs

Ce projet de réseau a regroupé initialement cinq immeubles (environ 50 foyers) équipés de panneaux photovoltaïques, dont les *prosumers* interagissent selon un protocole d'échanges décentralisés de contrats intelligents, Ethereum, déployés dans une *blockchain*. Plus récemment, il a évolué vers une plateforme *web* appelée Exergy. Les clients utilisent des compteurs intelligents pour contrôler leurs données de flux bidirectionnels d'énergie, en se basant sur l'utilisation d'un réseau *blockchain* dit "*distributed ledger technology*" (DLT) pour le stockage et la validation des transactions énergétiques dans cet environnement P2P.

Fonctionnement⁽⁴⁾

Un système basé sur la DLT opère sans qu'une partie tierce intervienne dans la régulation des échanges d'énergie de pair-à-pair. Il repose sur trois éléments essentiels : les contrats intelligents, la cryptographie, et un mécanisme d'accord. Les contrats intelligents sont un ensemble de règles logiques (auto-exécutoire et auto-exclusif) préprogrammées permettant d'aboutir à un accord d'échange. La cryptographie permet la sécurisation des écritures et garantit la protection des données et des informations. Enfin, le mécanisme d'accord rend possible un échange décentralisé.

Ce système repose donc sur la technologie *blockchain* dont l'objectif est de garantir la transparence, l'intégrité, la fiabilité, l'immutabilité et l'évolutivité des échanges de façon décentralisée, comme le soulignent Zia *et al.* (2019). Les droits d'accès dans la DLT peuvent être publics ou privés, avec ou sans permission. En cas de droit d'accès public sans permission, tous les acteurs du réseau peuvent enregistrer et valider des transactions. À l'inverse, pour un droit public avec permission, seuls certains utilisateurs sont autorisés. Si les droits d'accès sont privés, un contrat d'appartenance pour accéder au réseau est nécessaire. Il existe alors un arbitrage entre permission et efficacité du système. En effet, sans permission, le mécanisme de transactions est plus transparent, mais moins efficace, car moins performant avec des coûts de calcul plus élevés. À l'extrême inverse, avec permission privée, il devient moins transparent, mais plus efficace. Ce processus permet alors de déterminer un prix d'équilibre de marché pour chaque transaction, en utilisant des informations en temps réel sur les offres d'achats et de ventes à l'intérieur du réseau électrique décentralisé.

Autres types d'expériences

À la suite du cas iconique de Brooklyn, un grand nombre de projets P2P ont été développés de par le monde, comme Yeloha qui avait pour objectif de créer un Airbnb du solaire, sans succès au final. Chacune de ces expériences détient des caractéristiques propres, notamment en termes

(3) Lansiti et Lakhani (2017) : la *blockchain* est « un registre ouvert et distribué qui peut enregistrer les transactions entre deux parties de manière efficace, vérifiable et permanente ». Pour une analyse très complète de cette technologie, voir le numéro de la série *Réalités industrielles*, en août 2017, « *Blockchains* et *smart contracts* : des technologies de la confiance ? ». Perez (2018) analyse aussi ses enjeux dans le secteur énergétique.

(4) Pour une description plus technique, voir Zia *et al.* (2019).

de mécanismes de valorisation des échanges, de modèle d'affaires, etc.⁽⁵⁾. Certaines ont démontré que les *prosumers* pouvaient réaliser des économies de facturation (jusqu'à 20 % en moyenne) lors d'échanges d'électricité avec des pairs, comme pour le projet allemand très ambitieux Lition testé en 2018 (GJETC, 2020).

Les micro-réseaux P2P constituent aussi des solutions d'électrification domestique dans les pays en développement, au Bangladesh, en Malaisie, ou encore en Colombie avec le projet Transactive Energy Colombia implémenté à Medellin. Le point-clé de ces projets est de relier des *prosumers* à faible revenu, équipés de toitures photovoltaïques, et des consommateurs plus riches mais non équipés. Au Bangladesh, la société Solshare a développé des solutions technologiques similaires, mais basées sur des objets connectés (*smartphones*). Enfin, des solutions plus globales ont été simulées comme en Espagne afin d'interconnecter deux micro-réseaux, Walqa et Atenea, distants de 135 km (au sein du consortium P2P-SmarTest) et organisés autour de laboratoires industriels de petites entreprises du tertiaire. Cela implique la prise en compte d'acteurs supplémentaires comme un agrégateur et des sociétés de services auxiliaires.

Justifications de l'émergence des P2P énergétiques

De prime abord, les *prosumers* sont incités à participer à des micro-réseaux, car ils évitent les coûts de connexion au réseau traditionnel⁽⁶⁾, mais, au-delà, la question se pose quant aux raisons, opportunités et mécanismes qui poussent ces acteurs à adopter ce nouveau type d'organisation décentralisée d'échange d'électricité.

Cadre légal

Tout d'abord, la législation a récemment évolué en faveur de ces modes d'organisation. En Europe, la refonte du règlement sur l'électricité (UE 2019/943), la directive sur l'électricité (UE 2019/944) et celle sur les énergies renouvelables (UE 2018/2001), autorisent des règles novatrices de consommation et d'échange d'électricité, en particulier la reconnaissance juridique des échanges pair-à-pair⁽⁷⁾. Au-delà de ces considérations légales, un certain nombre de justifications économiques sous-tendent l'apparition de ces P2P en électricité.

Une première justification puise dans les idées de l'économie du partage. L'avènement global des échanges P2P de services numériques (Uber, Airbnb, etc.) est source d'inspiration pour le domaine électrique. Krishnan *et al.* (2003) soutiennent que les réseaux P2P peuvent être perçus soit comme des biens publics, soit comme des biens de club. Les caractéristiques de tels biens impliquent que le design des plateformes d'échange est essentiel pour éviter l'écueil de l'effondrement de marché.

Une seconde justification repose sur la création d'une valeur sociale commune générée par les *prosumers* du fait d'échanges locaux plutôt qu'avec les fournisseurs d'énergie traditionnels. Cette valeur sociale s'apparente à de l'altruisme où chacun préfère consommer de l'énergie produite par un pair et savoir avec qui il l'échange. Wilkins *et al.* (2020) montrent au travers d'expériences que les participants développent des valeurs partagées et s'attachent à la compréhension du fonctionnement du P2P. Cette coopération tacite dans les échanges pair-à-pair implique un surplus économique plus important, pour les consommateurs et *prosumers*.

Un troisième argument est environnemental. La Commission européenne a annoncé, en avril 2021, un objectif de réduction nette d'au moins 55 % des émissions de gaz à effet de serre de

(5) Pour les principales, voir Kusakana (2021).

(6) Pour IRENA (2020), environ 41,1 % des coûts de l'électricité sont représentés par ceux du *grid*, et donc évitables lors de transactions locales P2P.

(7) Plus précisément dans les articles 2, alinéas 14, 15, 16, 18 et 2-2.a de la directive UE 2018/2001.

l'UE d'ici 2030, par rapport au niveau de 1990. Les échanges P2P électriques s'inscrivent dans cette dynamique puisqu'ils sont principalement basés sur des unités de productions décentralisées solaires ou éoliennes. Cet objectif environnemental est de plus renforcé par la réduction des coûts complets du renouvelable, et contribue donc à favoriser le développement de ces micro-réseaux et l'apparition de *prosumers*.

Enfin, le dernier argument est de nature technologique. Le développement des technologies telles que la *blockchain* rend possible les échanges décentralisés et automatisés essentiels à l'équilibrage des offres et des demandes au sein des micro-réseaux, et ce sans intermédiaire (ou agrégateur), comme le notent Mengelkamp *et al.* (2018). D'autres objectifs sont atteignables *via* cette technologie, comme la maximisation des profits des *prosumers* ou la minimisation des coûts au sein du micro-réseau, ou encore la résolution d'éventuels problèmes de congestion et de défaillance.

Si les arguments précédents semblent importants, les intérêts personnels comme la valeur numéraire de l'énergie échangée et au minimum la rentabilité des investissements consentis par les *prosumers* sont aussi des éléments d'incitation non négligeables.

Les défis des P2P électriques

Si l'émergence des micro-réseaux P2P se comprend aisément, leur développement et leur mise en œuvre posent certaines questions et appellent plusieurs défis.

Le design des marchés P2P

Tout d'abord, les micro-réseaux énergétiques P2P sont affectés par les problématiques générales des P2P numériques, telles que Einav *et al.* (2016) les envisagent. Le design du marché P2P doit impérativement résoudre les questions d'appariements efficaces entre les *prosumers*. Cela contraint le processus de formation des prix qui repose sur des algorithmes sophistiqués, mais adaptés à l'architecture réelle du micro-réseau, comme l'indiquent Soto *et al.* (2021). Cette question est d'autant plus délicate que l'électricité implique des résolutions en temps quasi-continu pour égaliser offres et demandes, notamment si le système se veut autosuffisant. Des infrastructures de stockage sont ainsi nécessaires pour pallier les intermittences de la production, ainsi qu'un système d'information et de communication reliant les *prosumers* pour atténuer les problèmes de confiance réciproque. Ces services auxiliaires doivent être alloués au sein de l'infrastructure P2P sans perturber les mécanismes d'échanges, ce qui peut entraîner des surcoûts non désirés, ou bien l'intervention d'intermédiaires.

La formation des prix

Si la question de la formation des prix sur les plateformes numériques a été largement étudiée, notamment sous l'angle des marchés bifaces⁽⁸⁾, elle n'est qu'en partie transposable aux P2P électriques. En effet, les *prosumers* valorisent bien l'externalité d'appartenance au micro-réseau, mais, à la différence d'un marché biface traditionnel, ils valorisent moins l'externalité d'usage du fait de l'absence de différenciation du bien énergie. Ainsi, quel que soit le mécanisme de prix ou le modèle d'affaires implanté dans ces P2P, une motivation importante pour les *prosumers* à s'y engager est que l'électricité échangée à des pairs s'établira à un prix plus favorable que celui de *backup*. Cette propriété désirable n'est cependant pas forcément vérifiée⁽⁹⁾. En effet, l'électricité étant un bien homogène, le prix équilibre sera forcément ancré sur ce prix de *backup*.

(8) Pour une analyse complète, voir Rochet et Tirole (2003), et Weyl (2010).

(9) L'analyse de Cortade et Poudou (2021) montre que la valorisation intrinsèque des échanges P2P provoque un *markup* défavorable pour les *prosumers*, qu'ils soient acheteurs ou vendeurs à chaque instant.

Caractéristiques spécifiques

En tant que plateformes numériques, les P2P énergétiques présentent des caractéristiques spécifiques qui conditionnent leurs performances. Tout d'abord, la fourniture locale d'énergie comporte un risque inhérent à l'intermittence des énergies renouvelables dans la production distribuée. Les aléas météorologiques peuvent conduire certains *prosumers* à adopter des comportements opportunistes de "hold-up", en essayant de revendre à un prix exagéré. Ce risque est un frein au développement du micro-réseau, d'autant plus important qu'il se voudrait autosuffisant ou autarcique. La connexion au réseau traditionnel en *backup* atténue ce risque, mais réduit la valeur sociale des échanges locaux.

En conséquence, il existe un lien fort entre la réussite du P2P et la tarification de la fourniture du système de distribution traditionnel. Un risque « d'effet boule de neige » peut alors apparaître (comme dans le cas des communautés énergétiques, cf. Abada *et al.*, 2020b) : le développement des P2P énergétiques serait boosté par l'augmentation des tarifs d'accès au réseau électrique traditionnel due à la baisse des recettes d'accès consécutive à sa non-utilisation intermittente par les *prosumers*. Tous ces risques et comportements stratégiques pourraient altérer les incitations à investir dans des unités de production décentralisées dédiées au P2P, mais aussi à la marge dans la maintenance du réseau de distribution traditionnel⁽¹⁰⁾.

Conclusion

Le développement des micro-réseaux P2P est en cours. Néanmoins, leur multiplication nécessiterait un diagnostic public pour valider leur utilité sociale, et devrait s'accompagner d'une volonté politique qui permettrait de lever certaines barrières réglementaires. Dans l'exemple de Brooklyn, le cadre réglementaire n'a pas permis d'étendre les échanges P2P au-delà du micro-réseau, dans le réseau public de distribution. Il semble exister des inerties de natures économiques ou réglementaires empêchant l'avènement de l'Internet énergétique préfigurée par J. Rifkin en 2011. Selon lui, l'utilisation d'Internet permettrait de transformer le réseau électrique de tous les continents en un Internet énergétique, qui pourrait aider les ménages à revendre l'énergie excédentaire au réseau et à la partager avec les voisins, et au-delà.

Bibliographie

AZIM M. I., TUSHAR W. & SAHA T. K. (2020), "Investigating the impact of P2P trading on power losses in grid-connected networks with prosumers", *Applied Energy*, 263.

ABADA I., EHRENMANN A. & LAMBIN X. (2020a), "On the viability of energy communities", *The Energy Journal*, 41(1), pp. 113-150.

ABADA I., EHRENMANN A. & LAMBIN X. (2020b) "Unintended consequences: The snowball effect of energy communities", *Energy Policy*, 143(1).

CARAMIZARU A. & UIHLEIN A. (2020), *Energy communities: An overview of energy and social innovation*, Luxembourg, Publications Office of the European Union.

CORTADE T. & POUDOU J.-C. (2021), "Peer-to-peer energy platforms: Incentives for prosuming", working papers, hal-03212480.

(10) Selon Azim *et al.* (2020), des pertes de puissance peuvent apparaître du fait des échanges P2P dans les micro-réseaux connectés au traditionnel.

- EINAV L., FARRONATO C. & LEVIN J. (2016), “Peer-to-peer markets”, *Annual Economic Review*, 8, pp. 615-635.
- GJETC (2020), “Peer-to-peer electricity trading and power purchasing agreements”, report.
- IRENA (2020), “Innovation landscape brief: Peer-to-peer electricity trading”, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- KRISHNAN R., SMITH R. & TELANG R. (2003), “The economics of peer-to-peer networks”, *Journal of Information Technology Theory and Application*, 5(3), pp. 31-44.
- KUSAKANA K. (2021), “Optimal peer-to-peer energy sharing between grid-connected prosumers with different demand profiles and renewable energy sources”, *IET Smart Grid*.
- LANSITI M. & LAKHANI K. R. (2017), “The truth about blockchain”, *Harvard Business Review*, 95(1), pp. 118-127.
- MENGELKAMP E., GÄRTTNER J., ROCK K., KESSLER S., ORSINI L. & WEINHARDT C. (2018), “Designing microgrid markets: A case study: The Brooklyn Microgrid”, *Applied Energy*, 210, pp. 870-880.
- PEREZ Y. (2018), « Blockchain et applications dans le secteur électrique : opportunités et boîtes noires », *Lettre de L'INSHS*, mai, pp. 36-38.
- RIFKIN J. (2011), *The Third Industrial Revolution; How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*, Eds Palgrave MacMillan.
- ROCHET J.-C. & TIROLE J. (2003), “Platform competition in two-sided markets”, *Journal of the European Economic Association*, 1(4), pp. 990-1029.
- SOTO E. A., BOSMAN L. B., WOLLEGA E. & LEON-SALAS W. D. (2021), “Peer-to-peer energy trading: A review of the literature”, *Applied Energy*, 283.
- ZHANG C., WUA J., LONGA C. & CHENG M. (2017), “Review of existing peer-to-peer energy trading projects”, *Procedia Energy*, 105, pp. 2563-2568.
- ZIA M. F., BENBOUZID M., ELBOUCHIKHI E., MUYEEN S. M., TECHATO K. & GUERRERO J. M. (2020), “Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis”, *IEEE Access*, 8, pp. 19410-19432.
- WEYL E. G. (2010), “A price theory of multi-sided platforms”, *American Economic Review*, 100(4), pp. 1642-1672.
- WILKINS D. J., CHITCHYAN R. & LEVINE M. (2020), “Peer-to-peer energy markets: Understanding the values of collective and community trading”, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)*.