

Flexibilité des systèmes multi-énergétiques : État de l'art, définition et leviers

Multi-energy systems flexibility: State-of-the-art, definition and opportunities

Nathan MARTIN^{1*}, Osman JUNIOR^{1,3}, Astrid GANSWINDT^{1,2}, Jaume FITO¹, Lamia BERRAH³, Auline RODLER², Sihem GUERNOUTI², Julien RAMOUSSE¹

¹LabOratoire proCédés énergIe bâtimEnt (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc-CNRS, 60 avenue du lac Léman – 73376 Le Bourget-du-Lac Cedex

²Laboratoire Bâtiments Performants dans leur Environnement (BPE), Cerema, 12 bd Vincent Gâche – 44262 Nantes

³Laboratoire d’Informatique, Systèmes, Traitement de l’Information et de la Connaissance (LISTIC), Université Savoie Mont Blanc-CNRS, 5 Chemin de Bellevue – 74940 Annecy

Résumé – En réponse au besoin de transition énergétique, l'intégration massive des énergies renouvelables et de récupération, majoritairement intermittentes impose de considérer les potentiels de flexibilité des systèmes multi-énergétiques. À travers un état de l'art des définitions de la flexibilité, l'identification des limites des approches actuelles, se focalisant souvent sur des systèmes mono-vecteur et négligeant certaines caractéristiques, conduit à suggérer une définition générique s'appliquant aux systèmes multi-énergétiques. À partir de l'analyse des leviers de flexibilité identifiés, une classification des différentes sources de flexibilité est proposée.

Abstract - In response to the need for energy transition, the massive integration of mostly intermittent renewable and recovered energies requires us to consider the flexibility potential of multi-energy systems. Through a state-of-the-art review of definitions of flexibility, the identification of the limitations of current approaches, which often focus on single-vector systems and neglect certain characteristics, leads us to suggest a generic definition applicable to multi-energy systems. Based on an analysis of the flexibility levers identified, a classification of the different sources of flexibility is proposed.

1. Introduction

Les enjeux actuels de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de limitation des impacts environnementaux nécessitent de mettre en application une transition énergétique des énergies fossiles vers les énergies renouvelables et de récupération (ENR&R). Toutefois, l'intermittence de ces sources d'énergie impose la mise en place de solutions de flexibilité énergétique pour assurer le bon fonctionnement de ces systèmes énergétiques, pouvant coupler différents vecteurs énergétiques. De ce fait, les systèmes multi-énergétiques (SME) représentent une opportunité supplémentaire pour augmenter le potentiel de flexibilité, grâce aux interactions entre plusieurs vecteurs énergétiques. Un SME peut être défini comme un système qui combine des technologies et des infrastructures différentes [1] pour connecter et pour faire interagir plusieurs vecteurs énergétiques, tels que l'électricité, la chaleur, le gaz ou l'hydrogène [2]...

La définition et l'analyse de la flexibilité est fortement dépendante du point de vue adopté. Ainsi, plusieurs référentiels ont pu être observés : un point de vue techno-centré, issu des

sciences de l'ingénieur (que nous adopterons ici) qui distingue les flexibilités « directes » (pilotage des systèmes) des flexibilités « indirectes » (actions des usagers suite à une incitation). Le point de vue inverse, anthropocentré qui distingue les flexibilités « directes » (actions des usagers) des flexibilités « indirectes » (pilotage des systèmes), peut également être utilisé, principalement dans les analyses issues des sciences humaines et sociales. Enfin, les actions de flexibilité peuvent être distinguées par le qualificatif de « explicite » (en aval du compteur énergétique) ou « implicite » (en amont du compteur) utilisé par les agrégateurs d'énergie.

L'objectif de cet article est de participer à la compréhension des potentiels de flexibilité des SME. Pour cela, la première partie de ce travail vise à introduire une définition générique de la flexibilité des SME. Par la suite, une identification des leviers de flexibilité sera réalisée dans la deuxième partie.

2. Définition de la flexibilité des systèmes multi-énergétiques

Bien que la flexibilité soit un concept historique dans certaines disciplines, son application aux SME est encore balbutiante. Dans ce cadre d'application, la majorité des définitions relevées dans la littérature sont imprécises et/ou incomplètes. C'est pourquoi, l'objectif de cette analyse est de s'appuyer sur ces définitions en vue d'identifier les notions à préciser pour produire une définition générique non spécifique à un seul vecteur énergétique.

2.1. Analyse des définitions existantes

Au cours de nos recherches, nous avons remarqué qu'il existe relativement peu de définitions de la flexibilité des SME, bien que de nombreux travaux s'intéressent à la définition de la flexibilité des systèmes mono-vecteur, en particulier l'électricité. Dans cette analyse, nous étudierons les principales définitions de la flexibilité jugées pertinentes, au regard des vecteurs énergétiques et des échelles spatiotemporelles considérés.

Les premières définitions retenues comme point de départ sont des définitions de la flexibilité de systèmes électriques, qui contiennent des éléments permettant de caractériser la flexibilité des SME.

- *La flexibilité exprime la capacité d'un système électrique à maintenir un service continu face à des fluctuations rapides et importantes de l'offre ou de la demande, quelle qu'en soit la cause [3].*
- *La flexibilité désigne la capacité du système à atténuer de manière fiable et efficace les fluctuations et les incertitudes liées à la demande et à l'offre, et ce, sur diverses échelles de temps [4].*
- *La capacité de l'exploitation du système électrique, de ses actifs, des charges, des dispositifs de stockage d'énergie et des générateurs à modifier leur fonctionnement habituel pendant une durée limitée, en réponse à des signaux de demande de services externes, sans provoquer de perturbations imprévues [5].*

Ces premières définitions restent limitées au système électrique, mais l'idée de capacité à maintenir un équilibre face aux fluctuations entre l'offre et la demande, exprimée dans ces trois définitions, est une caractéristique importante pour définir la flexibilité des SME. L'ajout de signaux externes permet de souligner la prise en compte des contraintes extérieures au système.

Ces définitions possèdent tout de même certaines limites. L'utilisation du terme « offre » peut restreindre la compréhension de la flexibilité à une vision économique au niveau de la production d'énergie. Nous préférons donc ici parler de « ressources ». L'ajout d'une précision sur l'échelle temporelle semble primordial pour décrire la flexibilité, mais la notion de « durée limitée » (ou « fluctuations rapides ») est restrictive. En outre, comme nous avons pu le préciser

précédemment, ces définitions s'intéressent uniquement au vecteur électrique. Ainsi, ces définitions sont difficilement transposables en l'état aux autres vecteurs énergétiques (chaleur, gaz...).

Pour ouvrir cet état de l'art aux SME, les définitions suivantes ont été retenues, même si leur champ d'application se restreint au bâtiment.

- *La flexibilité énergétique d'un bâtiment est sa **capacité à gérer sa demande et sa production** en fonction des **conditions climatiques** locales, des besoins des occupants et des exigences du réseau énergétique* [6].
- *La capacité d'un bâtiment à **modifier, à court terme** (quelques heures ou quelques jours), sa **demande** et/ou sa **production** d'énergie en fonction des **conditions météorologiques**, des besoins des occupants et des exigences du réseau énergétique, sans compromettre les **capacités techniques** du bâtiment ni le confort des occupants* [7].
- *La flexibilité énergétique d'un bâtiment est sa **capacité à soutenir le fonctionnement** de l'ensemble du système énergétique du bâtiment en **ajustant** la relation entre sa **demande** et sa **production** d'énergie grâce à des stratégies d'exploitation spécifiques, conformément aux **conditions environnementales** locales et aux besoins des utilisateurs* [8].

Ces trois définitions traitent de la capacité à moduler (« gérer », « modifier », « ajuster ») la demande et la production d'énergie, notion commune avec les précédentes définitions sur la flexibilité des systèmes électriques, mais la finalité de cette modulation n'est pas spécifiée. En outre, le principe de contrainte est également pris en considération grâce à l'ajout des conditions climatiques [6], [7], [8], des exigences du réseau [6], [7] et des capacités techniques [7]. Le dernier point important souligné par la deuxième définition est l'échelle temporelle qui est nécessaire, mais cette précision peut sembler trop restrictive.

Ces définitions de la flexibilité des SME sont toutefois limitées car elles sont restreintes au système bâtiment. De plus, ces descriptions de la flexibilité ne traitent pas de la finalité de la modulation qui est de créer une adéquation entre les ressources et les demandes à une échelle supérieure au bâtiment (quartier, ville ...).

Au cours de nos recherches, nous avons également identifié les définitions suivantes de la flexibilité des SME dont l'application n'est pas réduite à l'échelle du bâtiment.

- *La flexibilité énergétique, de manière générale, désigne la **capacité d'un système à modifier la production ou la consommation** d'énergie distribuée* [8].
- *La flexibilité est la **capacité d'un système à assurer un équilibre** sûr et économique entre l'**offre** et la **demande** sur des **échelles spatiales et temporelles**, en tirant parti de divers actifs contrôlables et en les coordonnant de manière transparente* [9].
- *La flexibilité d'un système énergétique fait référence à sa **capacité d'adaptation** face aux divers changements auxquels il est confronté, incluant les **variations de la demande**, les **pertes** et **dégradations** d'**infrastructures**, les **fluctuations** de la **disponibilité des ressources** ainsi que les **évolutions de prix** des principaux **combustibles*** [10].
- *La flexibilité des SME est définie comme la **capacité technique** d'un système à réguler l'**approvisionnement multi-énergétique**, la **demande** et les **flux de puissance**, tout en respectant les **contraintes** en régime permanent et dynamiques, et en opérant dans des plages de fonctionnement prédefinies ou souhaitées pour certains vecteurs énergétiques* [11].

La première définition [8] est un exemple qui représente la majorité des définitions existantes sur la flexibilité des SME dont la description nous semble trop générique et imprécise. Les définitions suivantes soulignent des notions importantes telles que la capacité à assurer un équilibre entre l'offre (ressource) et la demande, ainsi que les contraintes économiques et techniques. Ces idées sont également soulignées dans les définitions à l'échelle du bâtiment et pour les systèmes électriques. De plus, l'utilisation des termes « variation » et « fluctuation » [10] permet de caractériser la variabilité existante des ressources et de la demande.

De notre point de vue, ces définitions oublient certains aspects de la flexibilité des SME tels que les contraintes sociales et environnementales, et les interactions possibles entre les différents vecteurs. En effet, les liens entre les différents vecteurs énergétiques (électricité, gaz, chaleur, hydrogène, etc.) restent peu abordés, or ces interactions représentent un intérêt non négligeable pour le développement de la flexibilité des SME.

2.2. Définition générique proposée

À l'aide des caractéristiques identifiées précédemment, nous proposons une nouvelle définition de la flexibilité des SME dans l'objectif de traduire au mieux les différentes éléments clefs relevés dans les précédentes définitions.

La flexibilité d'un système multi-énergétique désigne sa capacité à moduler son fonctionnement, de manière réactive et anticipative, pour maintenir l'adéquation entre les ressources et les demandes en réponse à leurs fluctuations, en exploitant les interactions entre les vecteurs énergétiques et en respectant les contraintes techniques, économiques, sociales et environnementales.

Le premier aspect de la flexibilité des SME traité est la capacité d'un SME à moduler son fonctionnement. Cette idée était présente dans les définitions étudiées précédemment et souligne qu'un SME peut être régulé, ajusté ou géré pour adapter son fonctionnement. Pour limiter la longueur de cette définition, le terme « fonctionnement » a été utilisé pour englober toutes les composantes d'un SME telles que la production, la conversion, la distribution, le stockage, la demande... Ainsi, cette formule permet de décrire l'intégralité d'un SME en évitant de lister toutes les chaînes énergétiques.

Ensuite, nous avons remarqué précédemment que la prise en compte de l'échelle de temps est nécessaire pour décrire la flexibilité des SME. L'échelle de temps est précisée grâce aux capacités anticipatives (pour améliorer les choix à moyen-long terme) et réactives (pour s'adapter rapidement aux événements imprévus, à court terme).

Dans cette définition, nous avons utilisé la notion d'adéquation pour décrire le besoin du SME à garantir un équilibre énergétique (bilan énergétique) entre les ressources et les demandes en fonction de leurs fluctuations dans le périmètre du système considéré. Les fluctuations peuvent être d'origines déterministes et stochastiques et s'entendent pour différentes échelles de temps (fluctuations rapides ou variations lentes).

Les différentes contraintes qui s'appliquent aux SME sont également précisées avec les contraintes économiques, sociales, techniques et environnementales, afin de ne négliger aucune des contraintes potentielles pouvant s'exercer sur le système.

Finalement, l'ajout des interactions entre les différents vecteurs permet de souligner la capacité d'un SME à profiter des différents vecteurs énergétiques pour augmenter son potentiel de flexibilité.

3. Sources de flexibilité

Cette section vise à classifier les différentes sources de flexibilité relevées dans la littérature. L'identification de ces sources de flexibilité est nécessaire pour pouvoir évaluer la flexibilité des SME. Pour cela, une proposition de classification des sources de flexibilité est présentée dans la Figure 1.

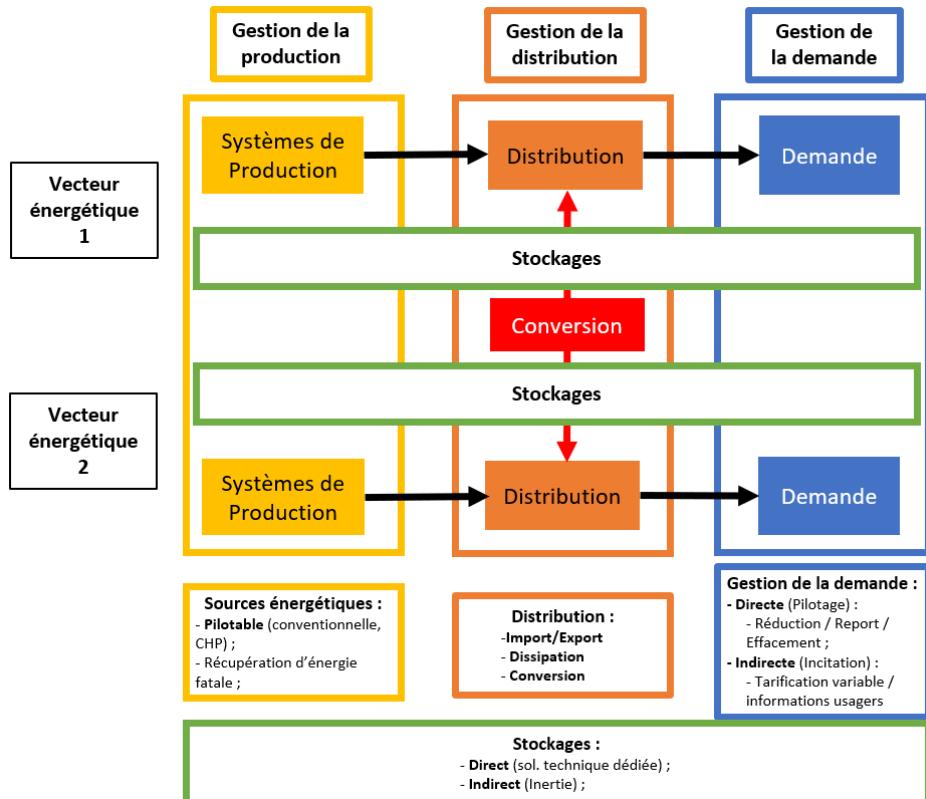


Figure 1 : Sources de flexibilité d'un système multi-énergétique

Cette représentation est limitée à deux vecteurs pour simplifier la représentation du système. Elle vise à mettre en évidence les composantes essentielles de la flexibilité des SME, couvrant l'intégralité de la chaîne énergétique : gestion de la production, de la distribution (incluant la conversion) et de la demande. Cette représentation illustre ainsi les processus qui permettent de faire face aux fluctuations des ressources et des demandes tout en tirant parti des complémentarités entre les différents vecteurs énergétiques.

La première composante de la flexibilité des SME exposée dans ce diagramme est la gestion de la production qui correspond à la gestion des différentes ressources nécessaires pour la production des multiples vecteurs énergétiques. Les interactions entre les vecteurs dans un SME permettent d'augmenter le nombre de leviers de flexibilité. Ainsi, les leviers de flexibilité identifiés pour la gestion de la production sont les systèmes de production et le stockage dont des exemples de solutions techniques sont présentées dans le tableau 1.

La deuxième composante est la gestion de la distribution qui correspond aux différentes actions entre la production et la demande qui complètent la chaîne énergétique, depuis la production jusqu'à la demande. Cette composante compte plusieurs leviers de flexibilité qui sont la distribution, la conversion et le stockage qui offrent de nombreuses solutions présentées également dans le tableau 1.

Finalement, la dernière partie est liée à la gestion de la demande qui peut être **directe** avec la mise en place d'un pilotage des différents équipements ou bâtiments, ou **indirecte** avec des

incitations à modifier sa consommation, dont un exemple simple est la mise en place de tarifs horaires différenciés (Heure Pleine/Heure Creuse). De plus, la gestion de la demande est également concernée par le stockage grâce à des solutions directes ou indirectes (telle que l'inertie thermique des bâtiments par exemple). Ainsi, la gestion de la demande offre de nombreuses solutions de flexibilité qui sont présentées dans le tableau 1.

Composante de flexibilité d'un SME	Catégorie de leviers de flexibilité	Levier de flexibilité	Références
Gestion de la production	Production	Récupération d'énergie fatale ; Système de production combiné d'électricité et de chaleur (CHP) ; Interaction réseau : Les bâtiments deviennent des "prosumers" ; Sources énergétiques pilotables (Conventionnelles) ;	[12], [13], [14], [15], [16], [17]
	Stockage	Pompage hydroélectrique	[16]
Gestion de la distribution	Distribution	Interconnexion des réseaux ou cluster (Import/Export) ; Dissipation ;	[18]
	Stockage	Inertie thermique dans le réseau ; Stockage sensible ; Air comprimé ; Batteries ; Vehicle-to-grid ; Stockage de chaleur par systèmes Matériaux à Changement de Phase ;	[8], [16], [19]
	Conversion	Électrolyse (Hydrogène)/Méthanation ; Chaudière électrique ; Pompe à chaleur ou machine frigorifique ;	[16],[20]
Gestion de la demande	Demande	Directe : Effacement/report ; Réduction ; Indirecte : Tarification horaire variable (Heure Pleine/Heure Creuse) ; Information des usagers ;	[14], [8], [21], [13], [19], [22]
	Stockage	Inertie thermique du bâtiment ; Réservoirs thermiques	[15], [22]

Tableau 1 : *Classification de leviers de flexibilité (liste non exhaustive)*

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons cherché à caractériser la notion de flexibilité des SME et à recenser les principaux leviers de flexibilité. Cette démarche s'inscrit dans un contexte de transition énergétique, où la nécessité de diminuer l'utilisation des énergies fossiles, d'augmenter la part des énergies renouvelables et de réduire les émissions de GES impose l'installation d'infrastructures capables de répondre aux fluctuations des ressources et des demandes. Cependant, l'absence d'une définition claire de la flexibilité des SME, combinée à la diversité des solutions techniques (production, distribution, stockage, gestion de la demande, etc.), rend difficile la compréhension de ce concept.

Pour lever ces ambiguïtés, nous avons proposé une définition approfondie de la flexibilité des SME, qui prend en considération les aspects techniques et économiques, ainsi que les enjeux sociaux et environnementaux. En outre, cette définition met en avant l'importance des interactions entre les différents vecteurs énergétiques qui composent un SME. Une représentation graphique et un tableau sont proposés pour illustrer et classer les diverses sources de flexibilité, de la production jusqu'à la demande (gestion de la demande directe ou indirecte) en passant par les composantes de distribution et de conversion.

Cependant, les apports de ces travaux soulèvent plusieurs questionnements sur l'application de la flexibilité. Tout d'abord, les différents leviers de flexibilité doivent être caractérisés suivant plusieurs critères : en puissance, en énergie, en durée, en temps de mise en œuvre... Ces critères doivent aider à identifier l'impact potentiel des différents leviers de flexibilité pour identifier leurs bénéfices (économiques, énergétiques, environnementaux, sociaux, etc.) et pour faciliter la prise de décision des gestionnaires. En outre, la prise en compte d'une échelle de temps impose de préciser la limite de cette échelle. Cette limite doit permettre de préciser le temps d'activation maximale d'une source de flexibilité. Ensuite, en ce qui concerne la gestion de la demande, la question de l'acceptabilité de certains leviers de flexibilité est cruciale pour s'assurer de leur efficacité. En effet, l'impact des solutions en lien avec la gestion de la demande dépend fortement de la facilité de mise en œuvre et de l'intérêt qu'elle peut représenter pour l'utilisateur.

Ainsi, ce travail offre un support pour assurer une meilleure compréhension de la flexibilité des SME et propose une méthode structurée pour identifier les divers leviers. Il ouvre la voie à des recherches futures, qui viseront à approfondir ce concept et à faciliter son application sur des SME.

Références

- [1] E. Azzouzi, « Multi-Faceted Modelling of Multi-Energy Systems: Stakeholders Coordination ».
- [2] P. Blaud, « Pilotage distribué de systèmes multi-énergies en réseau ».
- [3] International Energy Agency, *The power of transformation: wind, sun and the economics of flexible power systems*, Online-Ausg. Paris, France: OECD, 2014.
- [4] I. Abbà, A. La Bella, S. P. Cognati, et E. Corsetti, « Assessing flexibility in networked multi-energy systems: A modelling and simulation-based approach », *Energy Reports*, vol. 11, p. 384-393, juin 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2023.11.049.
- [5] M. Z. Degefa, I. B. Sperstad, et H. Sæle, « Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources », *Electric Power Systems Research*, vol. 194, p. 107022, mai 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107022.
- [6] S. Ø. Jensen *et al.*, « IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings », *Energy and Buildings*, vol. 155, p. 25-34, nov. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.044.
- [7] J. Le Dréau *et al.*, « Developing energy flexibility in clusters of buildings: A critical analysis of barriers from planning to operation », *Energy and Buildings*, vol. 300, p. 113608, déc. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113608.
- [8] Y. Guo, S. Wang, J. Wang, T. Zhang, Z. Ma, et S. Jiang, « Key district heating technologies for building energy flexibility: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 114017, janv. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114017.
- [9] E. Dall'Anese, P. Mancarella, et A. Monti, « Unlocking Flexibility: Integrated Optimization and Control of Multienergy Systems », *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 15, n° 1, p. 43-52, janv. 2017, doi: 10.1109/MPE.2016.2625218.
- [10] S. Yang *et al.*, « Flexibility index for a distributed energy system design optimization », *Renewable Energy*, vol. 219, p. 119423, déc. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119423.
- [11] G. Chicco, S. Riaz, A. Mazza, et P. Mancarella, « Flexibility From Distributed Multienergy Systems », *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, n° 9, p. 1496-1517, sept. 2020, doi: 10.1109/JPROC.2020.2986378.

- [12] J. Vivian, D. Quaggiotto, et A. Zarrella, « Increasing the energy flexibility of existing district heating networks through flow rate variations », *Applied Energy*, vol. 275, p. 115411, oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115411.
- [13] P. Huang *et al.*, « A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating », *Applied Energy*, vol. 258, p. 114109, janv. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114109.
- [14] K. Foteinaki, R. Li, T. Péan, C. Rode, et J. Salom, « Evaluation of energy flexibility of low-energy residential buildings connected to district heating », *Energy and Buildings*, vol. 213, p. 109804, avr. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109804.
- [15] I. Vigna, R. Pernetti, W. Pasut, et R. Lollini, « New domain for promoting energy efficiency: Energy Flexible Building Cluster », *Sustainable Cities and Society*, vol. 38, p. 526-533, avr. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.01.038.
- [16] P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, et J. Salpakari, « Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, p. 785-807, mai 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.057.
- [17] M. I. Alizadeh, M. Parsa Moghaddam, N. Amjadi, P. Siano, et M. K. Sheikh-El-Eslami, « Flexibility in future power systems with high renewable penetration: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, p. 1186-1193, mai 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.200.
- [18] J. Wang, Y. Zong, S. You, et C. Træholt, « A review of Danish integrated multi-energy system flexibility options for high wind power penetration », *Clean Energy*, vol. 1, n° 1, p. 23-35, déc. 2017, doi: 10.1093/ce/zkx002.
- [19] « A review of urban energy systems at building cluster level incorporating renewable-energy-source (RES) envelope solutions Xingxing Zhang,*, Marco Lovatib, Ilaria Vignab, Joakim Widénc, pdf ».
- [20] D. Møller Sneum, « Barriers to flexibility in the district energy-electricity system interface – A taxonomy », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, p. 111007, juill. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111007.
- [21] E. Kaushik, V. Prakash, O. P. Mahela, B. Khan, A. El-Shahat, et A. Y. Abdelaziz, « Comprehensive Overview of Power System Flexibility during the Scenario of High Penetration of Renewable Energy in Utility Grid », *Energies*, vol. 15, n° 2, p. 516, janv. 2022, doi: 10.3390/en15020516.
- [22] S. Martinez, M. Vellei, et J. Le Dréau, « Demand-side flexibility in a residential district: What are the main sources of uncertainty? », *Energy and Buildings*, vol. 255, p. 111595, janv. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111595.

Remerciements

Ce travail a été financé dans le cadre du projet FlexTASE du Programme et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) TASE (Technologies Avancées des Systèmes Energétiques), financé par France 2030 (n° ANR 22-PETA-0009).