

Indicateurs de flexibilité énergétique appliqués aux réseaux de chaleur

Jaume FITÓ^{1*}, Julien RAMOUSSE¹, Frédéric WURTZ²

¹ Laboratoire Procédés Energie Bâtiment (LOCIE), CNRS UMR 5271 – Université Savoie Mont Blanc, Polytech Annecy-Chambéry, Campus Scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-Du-Lac Cedex, France

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, 38000 Grenoble, France

* (auteur correspondant : eng.fito@gmail.com)

Résumé - Une méthodologie originale est proposée pour quantifier la flexibilité des réseaux de chaleur, entendue comme le degré de liberté dans le pilotage combiné de ses unités de production, de (dé-)stockage, de dissipation ou de modulation de la charge afin de répondre à une demande cible. La méthodologie, basée sur une approche combinatoire, et ses indicateurs sont décrits et leur mise en application illustrée sur un cas illustratif. Bien qu'ici présentée pour des réseaux de chaleur, la méthode est applicable à toute application énergétique multi-sources.

Nomenclature

C	nombre total de combinaisons	<i>Symboles grecs</i>
c	combinaison	Ω nombre de configuration du réseau
F	flexibilité	<i>Indices et exposants</i>
N	nombre total d'unités d'un réseau	op opérationnel(le)
n	unité numéro « n » d'un réseau	q à une puissance thermique concrète
Q	chaleur, MW_{th}	st structurel(le)
\dot{Q}	puissance thermique, MW_{th}	

1. Introduction

Le concept de flexibilité a été source de nombreuses définitions et d'ambiguïtés dans de nombreux domaines. Vis-à-vis des réseaux d'énergies, l'Agence Internationale de l'Energie donna en 2011 une première définition de « flexibilité » : la capacité d'un système énergétique à réagir aux évolutions temporelles de la production et de la demande d'énergie [1]. Les premières recherches actives au sujet de la flexibilité énergétique se sont centrées sur les réseaux électriques, visant leur décarbonation [2], et l'évolution de leur mix énergétique due à la valorisation des sources renouvelables [3]. Ainsi, les sources potentielles de flexibilité dans les réseaux électriques sont identifiées depuis longtemps [4]. Si les questionnements sur la flexibilité des réseaux de chaleur sont arrivés plus tardivement, plusieurs sources de flexibilité ont déjà été identifiées, souvent dans l'esprit d'apporter de la flexibilité aux réseaux électriques [5]. Les réseaux thermiques sont généralement considérés comme un moyen d'augmenter la flexibilité des réseaux électriques. Par exemple, les systèmes « power-to-heat » (P2H) augmentent la flexibilité car ils permettent de transformer en chaleur l'électricité produite en excès par des panneaux PV [11]. C'est peut-être à cause de ce rôle « d'appui aux réseaux électriques » que la recherche sur la flexibilité intrinsèque des réseaux de chaleur est moins évoluée. De plus, elle est souvent évaluée indirectement, par le biais d'une kyrielle d'indicateurs connexes à la flexibilité : le ratio des renouvelables dans le mix énergétique [12] ; des cartes opérationnelles exprimant les relations entre les puissances active et réactive d'un réseau électrique [13] ; des cartes opérationnelles reliant la production combinée de chaleur et d'électricité pour les unités de cogénération à l'interface entre des réseaux électriques et thermiques (voir Fig. 5 dans [9]) ; ou encore, le coût économique pour

améliorer la flexibilité, par exemple par le biais de meilleurs dispositifs de contrôle [14]. Concernant la flexibilité intrinsèque des réseaux de chaleur, l'approche classique consiste à mettre en place d'unités physiques de stockage thermique collectives centralisées [6] ou décentralisées [7], ou bien à l'utilisation de l'inertie thermique du réseau lui-même [8], malgré les limitations relevées pour les réseaux de nouvelle génération (basse température) [9]. D'autres approches consistent à contrôler les débits d'eau [10] ou leurs températures [7].

Si toutes les approches ci-dessus sont utiles et intéressantes, les auteurs de cet article pensent que le domaine des réseaux de chaleur manque d'indicateurs de flexibilité explicites et quantitatifs dédiés. Ainsi, la diversité d'unités énergétiques disponibles est une source de flexibilité importante, aussi bien pour la conception que pour le pilotage des réseaux, et pourtant assez méconnue [15] et apparemment dépourvue d'indicateurs quantitatifs. Enfin, des efforts sont nécessaires pour proposer des indicateurs découplés de simulations annuelles et d'autres indicateurs tels qu'économiques, car ces deux facteurs préjugent d'une stratégie de contrôle prédéfinie. Il apparaît donc important de développer des indicateurs dédiés à l'analyse de la flexibilité potentielle des systèmes énergétiques multi-sources, avec leur propre formulation et grandeur (voire leurs propres unités), afin de pouvoir caractériser avec précision la flexibilité des réseaux d'énergie.

Cet article propose une interprétation de la flexibilité inspirée de la notion d'entropie en mécanique statistique. L'entropie statistique peut s'entendre comme la diversité d'états microscopiques correspondant à l'état macroscopique d'un système. La méthode propose d'entendre la flexibilité comme la variété de combinaisons d'unités énergétiques d'un réseau (états microscopiques) permettant de répondre à une demande thermique globale (macroscopique). Ainsi, on peut quantifier la flexibilité comme le logarithme des combinaisons possibles entre les différentes unités énergétiques d'un réseau (Fig. 1). Cette notion est déclinée en combinaisons d'unités (flexibilité dite « structurelle ») et combinaisons dans le pilotage des unités (flexibilité dite « opérationnelle »). Un indicateur explicite et adimensionnel, proportionnel au nombre de combinaisons, est proposé pour chaque déclinaison. L'analyse tient compte d'unités de production pilotable ou non-pilotable (renouvelables), de stockage thermique (unité physique, inertie du réseau), de consommation ou dissipation thermique, ou de gestion de la demande (« demand-side management », DSM).

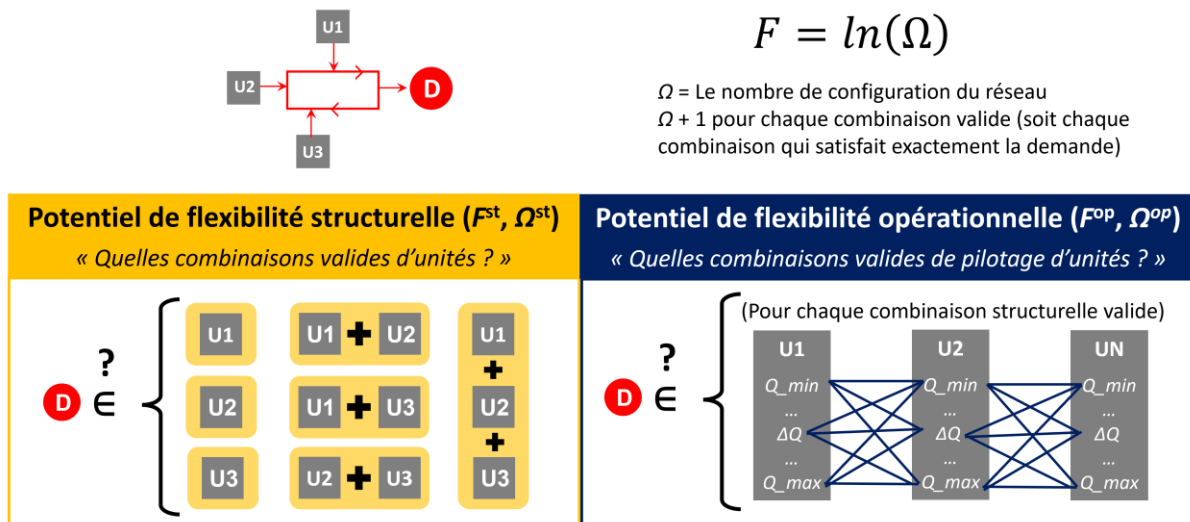


Figure 1 : Schéma de principe de l'approche proposée

2. Méthode

2.1. Hypothèses et prétraitement des données

Cette méthodologie est basée sur une approche combinatoire de l'ensemble des unités équivalentes de production, stockage, dissipation et de demande, s'appuyant sur les hypothèses et postulats ci-dessous :

- Le système analysé est en régime pseudo-permanent : toute demande est satisfaite à chaque instant à partir des unités équivalentes considérées. La flexibilité offerte par l'inertie interne du réseau et/ou les stockages peut être considérée à l'aide des unités équivalentes de stockage, et les stratégies d'anticipation ou de décalage des besoins via les unités équivalentes de « Demand-side management » (DSM).
- Les problématiques d'inadéquation de la température ne sont pas modélisées. Il est en effet supposé que l'offre satisfait le niveau de température exigé par la demande (adéquation en qualité des puissances thermiques). En revanche, seuls les scénarios où la puissance thermique exigée par la demande est exactement satisfaite (en quantité) sont comptabilisés.
- Les pertes de charge dans les canalisations sont négligées.
- Les considérations spatiales ne sont pas modélisées dans la méthode. Il est tout de même possible d'en tenir compte lors du prétraitement des données en entrée. Ainsi, les pertes de chaleur par distribution peuvent être décomptées de la puissance thermique d'une unité, afin de représenter dans la méthode la puissance thermique finale délivrée aux utilisateurs.

Les différentes sources de flexibilité d'un réseau sont modélisées en tant que plages de puissances thermiques. Le tableau 1 montre comment l'équivalence peut être établie pour différentes sources de flexibilité.

<i>Unité équivalente</i>	<i>Exemple</i>
Production pilotable	Chaudière à gaz dont la puissance est modulable
Production non-pilotable (Dé-)stockage	Champ de capteurs solaires thermiques Stockage sensible, latent, ou par inertie du réseau
Dissipation ou délestage	Dissipation via des aérothermes, exports d'énergie
« Demand-side management » (DSM)	Anticipation/décalage des besoins en chauffage

Tableau 1 : *Unités énergétiques équivalentes considérées*

2.2. Flexibilité structurelle

Soit un réseau de chaleur équipé avec N unités équivalentes parmi la liste fournie dans le tableau 1. Les puissances thermiques minimale et maximale du réseau résultent de la somme des puissances thermiques spécifiques minimales et maximales de toutes les unités (éq. 1).

$$\dot{Q}_N^{\dagger} = \sum_{n=1}^N \dot{Q}_n^{\dagger} \quad (\dagger = \min, \max) \quad (1)$$

Pour l'analyse de flexibilité, le pas de pilotage global du réseau a été défini comme le plus grand commun diviseur des pas de pilotage de toutes les unités (éq. 2). Ce pas de pilotage global, avec les puissances minimale et maximale globales, détermine les points de fonctionnement (série opératoire) du réseau (éq. 3).

$$\Delta \dot{Q}_N = \text{PGCD}(\Delta \dot{Q}_{j=1}, \dots, \Delta \dot{Q}_{j=N}) \quad (2)$$

$$Q_N \in [\dot{Q}_N^{\min} : \Delta \dot{Q}_N : \dot{Q}_N^{\max}] \quad (3)$$

La flexibilité structurelle est évaluée pour chaque puissance de cette série opératoire. Toutes les combinaisons possibles d'unités sont prises en compte, en allant de 1 jusqu'à N unités sélectionnées. Pour chaque puissance demandée, le nombre de combinaison d'unités (Ω_q^{st}) permettant de répondre à cette puissance est déterminée par l'éq. 4.

$$\forall Q \in Q_N \text{ et } \forall st \in C^{st} \quad \text{si } Q \in Q^{st} \Rightarrow \Omega_q^{st} = \Omega_q^{st} + 1 \quad (4)$$

En supposant que toutes les combinaisons sont équiprobables, la flexibilité structurelle est déterminée par analogie à l'équation de Boltzmann (éq. 5).

$$F_q^{st} = \ln(\Omega_q^{st}) \quad (5)$$

Une valeur de $\Omega_q^{st} = 0$ indique un point d'étranglement, c'est-à-dire une demande de puissance thermique qu'aucune combinaison structurelle d'unités énergétiques ne peut satisfaire. Une Ω_q^{st} égal à l'unité indique un point structurellement rigide, c'est-à-dire qu'une seule combinaison structurelle peut satisfaire la demande. Notez qu'une combinaison ne signifie pas nécessairement une seule unité ; il peut s'agir d'une combinaison de plusieurs unités. Une Ω_q^{st} supérieur à l'unité signifie que le réseau est structurellement flexible, c'est-à-dire que plusieurs combinaisons d'unités peuvent répondre à la demande. Plus la valeur de F_q^{st} est élevée, plus le réseau est flexible pour la demande considérée.

2.3. Flexibilité opérationnelle

La flexibilité opérationnelle s'intéresse aux combinaisons de pilotage des unités, plutôt que des combinaisons d'unités. En effet, souvent une même combinaison d'unités peut se piloter de différentes façons afin de satisfaire une même demande. Le nombre de configuration opérationnel se détermine de façon similaire à celui structurel, avec une différence : chaque combinaison valide de puissances thermiques compte (éq. 6).

$$\forall Q \in Q_N \text{ et } \forall st \in C^{st} \quad \forall q^{st} = q \Rightarrow \Omega_q^{op} = \Omega_q^{op} + 1 \quad (6)$$

On entend par combinaison valide celle qui satisfait la demande de puissance exacte (une surproduction des unités de production peut être envisagée tant que celle-ci peut être gérée, c.-à-d. stockée ou dissipée). La flexibilité opérationnelle est le logarithme du nombre de configuration opérationnel (éq. 7).

$$F_q^{op} = \ln(\Omega_q^{op}) \quad (7)$$

Les analyses structurelle et opérationnelle, appliquées sur toute la plage opératoire d'un réseau telle que définie par l'équation 4, conduisent à deux distributions de flexibilités (structurelle et opérationnelle). Les flexibilités structurelle et opérationnelle globales (sur la plage de demande considérée) sont obtenues par sommation (éq. 9).

$$\Omega^{st/op} = \sum_q \Omega_q^{st/op} \quad (8)$$

$$F^{st/op} = \ln(\Omega^{st/op}) \quad (9)$$

L'outil de calcul, développé sous Python est accessible sur GitHub (<https://github.com/locie/District-heating-flexibility>). Il repose sur les modules « *built-in* » de Python tels que « *itertools* », « *numpy* » et « *matplotlib* », auxquels ont été ajoutés plusieurs fonctions pour gérer les données en entrée, effectuer les analyses de flexibilité (structurelle et opérationnelle), et afficher les résultats sous forme de graphiques.

3. Exemple illustratif

La section précédente a décrit les indicateurs innovants des flexibilités structurelles et opérationnelles et comment les évaluer. Cette section montre comment appliquer la méthodologie et effectuer une analyse détaillée de la flexibilité d'un réseau de chaleur. À cette fin, un exemple illustratif simple a été élaboré afin d'illustrer la richesse de l'analyse de flexibilité proposée. Rappelons aux lecteurs que le résultat réel de cet article est la méthodologie elle-même, et non cet exemple illustratif.

3.1. Description du système et données d'entrée

L'exemple illustratif consiste en un réseau de chaleur doté de 6 unités (tableau 2). Pour rappel, il s'agit d'unités équivalentes, qui peuvent représenter des dispositifs physiques, un processus/machine complet ou une technique de gestion de l'énergie. Certaines séries opératoires (p. ex. P-03), bien que peu réalistes, sont utilisées dans un objectif d'illustration.

	<i>Unité réelle</i>	<i>Unité équivalente</i>	<i>Plage opératoire</i>
P-01	Chaudière biomasse	Production pilotable	[0, 2, 3] MW
P-02	Pompe à chaleur	Production pilotable	[0, 3, 4] MW
P-03	Import de chaleur	Production pilotable	[0, 14, 15] MW
D-01	Aérothermes	Dissipation	[-1, 0] MW
S-01	Stockage thermocline	(Dé-)stockage	[-1, 0, 1] MW
DSM	Anticiper ou reporter les besoins thermiques des bâtiments	Contrôle de la demande	[- 1, 0, 1] MW
NP-01	Capteurs solaires thermiques	Prod. Non-Pilotable	[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6] MW

Tableau 2 : Unités énergétiques équivalentes considérées dans le système d'exemple

3.2. Analyse des flexibilités structurelle et opérationnelle

Les figures 1 et 2 présentent, respectivement, les distributions de flexibilités dites structurelle et opérationnelle, en fonction de la plage de puissances agrégée du réseau. Dans cet exemple, la borne inférieure (-3 MW) correspond à une production nulle (P-01 = P-02 = P-03 = 0MW), et la mise en œuvre des stratégies de délestage (S-01= -1 MW ; D-01 = -1 MW ; DSM = -1 MW). La borne supérieure (+24 MW) correspond à 22 MW produits (P-01 = +3 MW, P-02 = +4 MW, P-03 = +15 MW), au déstockage de l'unité de stockage (S-01 = +1 MW) et à l'anticipation d'une demande (DSM = +1 MW).

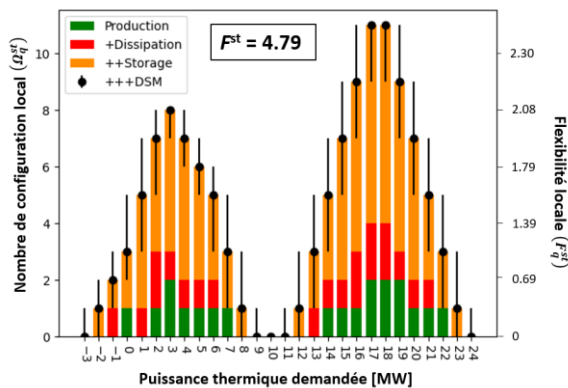


Figure 1 : Distribution de flexibilité structurelle

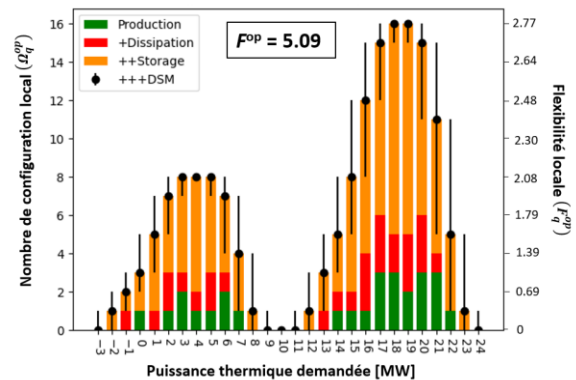


Figure 2 : Distribution de flexibilité opérationnelle

L'axe des ordonnées représente la flexibilité locale à chaque puissance, déterminée par les méthodes décrites dans les sections 2.2 (structurale) et 2.3 (opérationnelle). La contribution des unités de production (barres en vert) est représentée à la base de la distribution car elle ne dépend pas des autres types d'unités. Ensuite, les unités de dissipation sont représentées en combinaison avec la production (barres en rouge), car elles ne peuvent que soustraire du système de la chaleur déjà apportée par d'autres unités. La contribution des unités de stockage est représentée en combinaison avec les productions et les dissipations (barres en orange). Elle dépend d'une production préalable (qui a pu être partiellement dissipée), mais aussi de l'état de charge des unités de stockage. Les lignes noires asymétriques verticales représentent les effets de la mise en œuvre des techniques de DSM, une fois les autres unités considérées. Ainsi, les unités de production pilotables vont déterminer la plage de flexibilité globale ; les autres unités ne font qu'élargir la plage de flexibilité mise en place par les productions. La dissipation l'élargit vers la gauche, tandis que le (dé-)stockage l'élargit vers la gauche et vers la droite. Les techniques de DSM, en déplaçant la demande vers d'autres puissances, peuvent se révéler avantageuses ou non en fonction de la flexibilité locale des puissances voisines.

Dans ce cas illustratif, les productions permettent deux plages de flexibilités : $[2 - 7]$ MW et $[14 - 22]$ MW, qui résultent de toutes les combinaisons possibles entre les unités de production P-01, P-02 et P-03. Ensuite, la prise en compte de l'unité de dissipation permet de répondre à des demandes supplémentaires (-1 MW, 1 MW et 13 MW). L'unité de stockage permet d'étendre les plages de flexibilité : $[-2 \text{ MW} ; 8 \text{ MW}]$ et $[12 \text{ MW} ; 23 \text{ MW}]$. De plus, les unités de dissipation et de stockage augmentent la flexibilité locale sur les plages de puissance déjà couvertes par les unités de production. La représentation cumulative proposée ici permet de mettre en évidence les synergies cumulatives entre les différentes unités considérées. Quantifier et localiser précisément les différentes synergies entre unités est une perspective intéressante prévue par les auteurs.

Les effets potentiels du DSM (lignes noires verticales) représentent la plus grande variation possible de la valeur de flexibilité dans la plage de fonctionnement de l'unité DSM autour d'une puissance spécifique. Le DSM peut ainsi déplacer la demande vers des puissances où la flexibilité locale du réseau serait différente. Par exemple, la flexibilité structurale locale à 4 MW ($\Omega = 7$ combinaisons sans DSM) peut varier entre $\Omega = 6$ et $\Omega = 8$, car le DSM de +/- 1 MW déplacerait la demande à 5 MW ou à 3 MW respectivement. Le DSM permet toutefois une certaine flexibilité pour les demandes de puissance non accessibles par la combinaison des autres unités (-3 MW, 9 MW, 11 MW et 24 MW dans cet exemple). Si une puissance est dans un plateau de flexibilité (p. ex. 10 MW), le DSM n'aura aucun effet sur sa flexibilité.

Toute puissance susceptible de présenter une flexibilité nulle par cause d'un DSM mal géré est un point d'étranglement potentiel. Toute tranche de puissance à flexibilité nulle, mais augmentable grâce au DSM, est un point d'étranglement contournable. Toute tranche de puissance à flexibilité nulle, même après prise en compte des stratégies de DSM, est un point d'étranglement dur.

Les effets de la production d'énergie non pilotable (par exemple, les énergies renouvelables) sont affichés dans les figures 3 et 4. Une production non pilotable de 6 MW a été supposée. Cela pourrait symboliser, par exemple, la mise en place d'un champ de capteurs solaires thermiques avec une production de pointe de 6 MW. La production non pilotable est modélisée comme un apport de chaleur au réseau non modulable en puissance, qui doit donc être utilisée, stockée ou dissipée. De ce fait, les deux distributions de flexibilité sont déplacées vers la droite sur l'axe des x (voir les figures 4a et 4b), sans modification du nombre de combinaisons possibles. Pour une analyse complète des conséquences de la production variable non-pilotable il faut donc envisager une puissance variable comprise entre 0 MW et +6 MW.

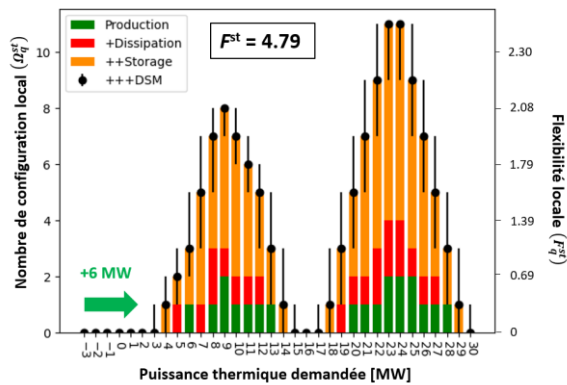


Figure 3 : Flexibilité structurelle après l'intégration d'une source non-pilotable

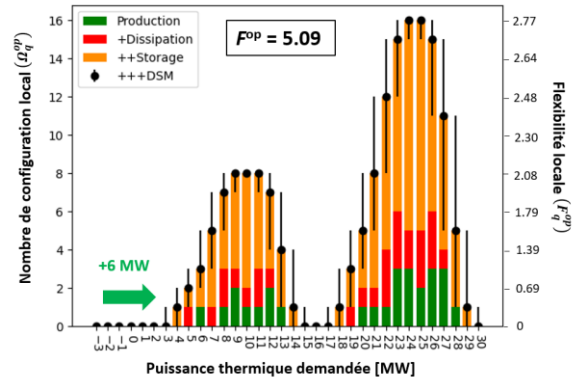


Figure 4 : Flexibilité opérationnelle après l'intégration d'une source non-pilotable

L'effet des productions non pilotables sur la distribution de flexibilité devient plus évident lorsque le réseau est confronté à un profil concret de demande. En effet, les régions opératoires à haute flexibilité (typiquement ciblant les demandes thermiques les plus fréquentes) se verront décaler. Le réseau risque donc de devenir trop dépendant de certaines configurations sur des plages de demandes différentes par rapport à sa conception initiale. Par conséquent, la méthodologie présentée dans cet article peut être utilisée pour la détection précoce des problèmes de flexibilité dus aux évolutions du mix énergétique d'un territoire.

4. Discussion sur la méthode

L'objectif de l'approche proposée est d'évaluer le potentiel de flexibilité d'un système multi-sources indépendamment de toute stratégie de contrôle. C'est la raison pour laquelle les auteurs parlent de "potentiel de flexibilité", au lieu de "flexibilité" tout court. Une simulation dynamique ne peut donner qu'une idée « circonstancielle » de la flexibilité d'un réseau, car elle préjuge de la stratégie de pilotage mise en place, reposant sur un objectif quelconque tel que l'efficacité énergétique, l'efficacité exergetique, la performance économique, ou les effets environnementaux. Toute combinaison qui satisfait la demande tout en respectant le bilan énergétique est considérée valable, ce qui permet d'envisager l'ensemble des solutions techniques indépendamment des stratégies de pilotage appliquées par l'opérateur. Le principal avantage d'une approche combinatoire est alors de couvrir de façon exhaustive les possibilités de configuration du système. La sélection de la combinaison retenue devra être guidée par le critère sélectionné par l'opérateur en fonction de la stratégie de pilotage visée.

En revanche, les temps de calcul sont le point faible d'une approche combinatoire, notamment si le nombre d'unités est supérieur à 15. Toutefois, cette difficulté peut être contournée en regroupant des unités équivalentes au fonctionnement similaire afin de réduire les combinaisons possibles.

5. Conclusion et perspectives

La caractérisation des systèmes énergétiques multi-sources nécessite la mise en place d'indicateurs explicites et quantitatifs pour décrire le potentiel de flexibilité complémentaires aux critères de performance classiquement utilisés. Dans cet article, les auteurs donnent une réponse à cette carence par une approche combinatoire dans le cas des réseaux de chaleur urbains. Elle entend le potentiel de flexibilité comme le degré de liberté dans la sélection et le pilotage (séparé ou simultané) des unités d'énergie face à diverses demandes. Cette approche

pourra être facilement adaptée à différents cas d'application des systèmes énergétiques multi-sources. Les constats et perspectives suivantes se dégagent de ce travail préliminaire :

- La méthode peut aider à la planification énergétique des réseaux d'énergie urbains. Elle permet en effet d'anticiper des points d'étranglement potentiels, ou les possibles effets du déploiement des énergies renouvelables sur les réseaux existants.
- Il est prévu d'étudier l'applicabilité de la méthode à d'autres réseaux énergétiques tels qu'électriques, le froid urbain ou les réseaux de gaz, éventuellement interconnectés. La formulation adimensionnelle de la méthode permettrait d'étendre son application.
- Il est prévu de définir des indicateurs complémentaires, par exemple une flexibilité « effective » qui permettrait d'évaluer l'adéquation entre les profils de flexibilités évalués et un profil de demande donné, afin de quantifier si le potentiel de flexibilité du réseau est adapté à ces sollicitations en demande.

Références

- [1] H. Chandler, *Harnessing variable renewables: A Guide to the Balancing Challenge*. 2011. [Online]. www.oecd.org/publications/harnessing-variable-renewables-9789264111394-en.htm
- [2] M.R.M. Cruz *et al.*, A comprehensive survey of flexibility options for supporting the low-carbon energy future, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 97 (2018), 338–353.
- [3] C. Brunner *et al.*, The future need for flexibility and the impact of fluctuating renewable power generation, *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 1314–1324, 2020.
- [4] M. Z. Degefa *et al.*, Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 194 (2021), 107022.
- [5] H. Golmohamadi *et al.*, Integration of flexibility potentials of district heating systems into electricity markets: A review, *Renew. Sustain. En. Rev.*, 159 (2020).
- [6] J. Hennessy *et al.*, Flexibility in thermal grids: A review of short-term storage in district heating distribution networks, *Energy Proc.*, 158 (2019), 2430–2434.
- [7] A. Hammer *et al.*, Increasing district heating networks efficiency by means of temperature-flexible operation, *Sustain. Energy, Grids Networks*, 16 (2018), 393–404.
- [8] W. Wang *et al.*, Combined heat and power control considering thermal inertia of district heating network for flexible electric power regulation, *Energy*, vol. 169, pp. 988–999, 2019.
- [9] Y. Zhang *et al.*, Feasibilities of utilizing thermal inertia of district heating networks to improve system flexibility, *Appl. Therm. Eng.*, 213 (2022), 118813.
- [10] J. Vivian *et al.*, Increasing the energy flexibility of existing district heating networks through flow rate variations, *Appl. Energy*, 275 (2020), 115411.
- [11] A. Gravelsins *et al.*, Solar power in district heating. P2H flexibility concept, *Energy*, 181 (2019), 1023–1035.
- [12] H. Schrammel *et al.*, Increasing flexibility towards a virtual district heating network, *Energy Reports*, 7 (2021), 517–525.
- [13] P. Li *et al.*, Operational flexibility of active distribution networks: Definition, quantified calculation and application, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 119 (2020), 105872.
- [14] M. H. Abokersh *et al.*, Flexible heat pump integration to improve sustainable transition toward 4th generation district heating, *Energy. Conv. Manag.*, 225 (2020), 113379.
- [15] Z. Ma *et al.*, A literature review of energy flexibility in district heating with a survey of the stakeholders' participation, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 123 (2020), 109750.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'Institut Carnot Energies du Futur pour leur soutien par le biais du financement accordé au projet FlexENR.