

Les stockages distribués pour diminuer la température d'opération des réseaux de chaleur existants

Distributed storage to reduce supply temperature in existing district heating networks

Anne-Geneviève LEMELLE^{1,2*}, Nicolas LAMAISON¹, Nicolas VASSET¹, Jean-Michel RENEAUME², Sylvain SERRA²

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Litén, Campus Ines, 73375, Le Bourget du Lac France

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaTEP, Pau, France

*(auteur correspondant : anne-genevieve.lemelle@cea.fr)

Résumé - Pour décarboner le secteur de la chaleur, les réseaux de chaleur sont essentiels. La diminution de leur température d'opération est envisagée pour améliorer leur efficacité et y intégrer davantage de sources d'énergie décarbonées. Cela implique la mise à niveau de certains éléments dont les conduites qui sont confrontées à une augmentation du débit au-delà de la limite recommandée. A l'aide du logiciel de simulation numérique DistrictLab-H Simulation Studio, cet article propose l'étude d'une solution de mise à niveau encore non déployée sur le terrain qui consiste à ajouter des stockages dits distribués en aval des conduites concernées par ce dépassement de débit.

Abstract - District heating networks are essential to decarbonize heating. To improve their efficiency and introduce more low-carbon sources, the reduction of their supply temperature is considered. This entails retrofitting components, including pipes, that are subjected to a velocity increase that exceeds the recommended limit. Using the numerical simulation software DistrictLab-H Simulation Studio, this work proposes a solution not yet deployed involving the introduction of distributed storage downstream of the affected pipes.

1. Introduction

Le secteur de la chaleur représente une part importante des émissions mondiales de CO₂. En effet, ce secteur correspond à près de la moitié de l'énergie finale consommée dans le monde, produite aux trois quarts à partir de combustibles fossiles [1]. Dans la littérature, les réseaux de chaleur sont présentés comme une brique essentielle de la stratégie de décarbonation des secteurs résidentiel et tertiaire ([2], [3], [4]). Pour améliorer leur efficacité et y intégrer davantage de sources de production bas-carbone, la diminution de leur température d'opération est envisagée ([5], [6]). Cependant, les réseaux de chaleur existants n'ont pas été dimensionnés pour cette évolution et plusieurs éléments doivent alors être mis à niveau [7]. Entre autres, pour satisfaire la même demande sur le réseau, la diminution de la température d'opération implique une augmentation du débit du fluide dans les conduites parfois au-delà de valeurs préconisées pour l'écoulement ce qui entraîne notamment l'usure prématuée des conduites.

La revue [7] dresse un inventaire des solutions envisagées pour remédier à ce phénomène de congestion hydraulique : ajout d'un système local de production de chaleur, maîtrise de la demande, alimentation des consommateurs avec la ligne retour et ajout de stockages sensibles en eau, distribués sur le réseau.

Cette dernière solution n'a pas été étudiée dans la littérature en autres pour sa complexité d'opération. Pourtant, elle a plusieurs atouts comme son faible coût et sa praticité d'installation. De manière générale, les stockages *distribués* sont peu mentionnés dans la littérature. Du côté des revues sur les réseaux de chaleur, la plupart décrivent les stockages comme étant de grande taille à proximité du site de production principal, donc ceux dits *centralisés* ([4], [8], [9], [10], [11]). Les revues spécifiques aux stockages de chaleur sur réseaux de chaleur distinguent les stockages *centralisés* et *distribués*. Certaines décrivent les stockages distribués comme ceux n'étant pas au niveau de la production [12]. D'autres les définissent comme étant des stockages de petite taille au niveau des bâtiments ([13], [14], [15]) ce à quoi [16] ajoute un aspect court-terme. Indépendamment de ces revues, une trentaine d'études de simulation et optimisation de réseaux de chaleur mentionnent des stockages *distribués*. La moitié de ces études s'intéresse à des configurations de stockage qui ne semblent pas adaptées pour résoudre le problème de congestion hydraulique. Certaines parlent de stockages localisés au secondaire des sous-stations, i.e. du côté consommateur, hors du périmètre de contrôle de l'exploitant du réseau ([17], [18], [19], [20]). D'autres décrivent un stockage localisé au niveau d'un site de production de chaleur lui-même décentralisé sur le réseau ([21], [22]). Enfin, certaines qualifient de *stockage distribué* l'inertie thermique des bâtiments reliés au réseau ([23], [24]).

Les stockages distribués proposés pour résoudre la congestion hydraulique sont de type sensible, utilisant de l'eau, et sont situés le long du réseau, entre l'unité de production de chaleur principale et les consommateurs, sous la responsabilité de l'exploitant. Dans les études concernées par cette définition, le stockage distribué est intégré au réseau fonctionnant à sa température de dimensionnement donc en l'absence de risque de congestion hydraulique. Cependant, certaines de ces études mettent en avant des comportements du stockage qui devraient contribuer à la résolution de la congestion hydraulique. En effet, [25], [26] démontrent que les stockages distribués écrètent les pics de demande sur un réseau de chaleur existant ce qui implique que le débit maximal dans les conduites diminue. De même, [27] conclut que les stockages distribués permettent de diminuer le diamètre des conduites installées sur un nouveau réseau ce qui signifie aussi que le débit maximal est moins élevé.

Ces trois études prouvent que les stockages distribués permettent de diminuer le débit maximal dans les conduites du réseau de chaleur. Il reste à explorer si cette diminution est d'une amplitude suffisante pour éviter que le débit augmente au-delà de la limite constructeur lorsque le réseau fonctionne à une température plus basse que celle pour laquelle il avait été construit.

Cet article propose la mise en place d'un modèle pour l'étude d'un réseau de chaleur confronté au phénomène de congestion hydraulique due à la réduction de sa température d'opération. Ce réseau est simple, constitué de seulement trois consommateurs. Il est simulé sur DistrictLab-H Simulation Studio, un logiciel de simulation dynamique de réseaux de chaleur basé sur une formulation des équations thermo-hydrauliques en une dimension [28]. Deux solutions sont testées pour résoudre la congestion hydraulique, le remplacement des conduites critiques et l'ajout d'un stockage distribué en aval de ces conduites. Chaque solution est caractérisée avec des indicateurs énergétiques.

2. Résultats

La Figure 1 montre le réseau de chaleur construit sur le logiciel de simulation DistrictLab-H Simulation Studio. Il est composé d'un site de production de chaleur (en haut à droite) et de 3 consommateurs (dénommés C1, C2, C3). Une conduite aller achemine la chaleur de la production aux consommateurs. Une fois cette chaleur livrée aux consommateurs, une ligne retour reconduit le fluide refroidi au site de production. Ce fluide est chauffé au sein du site de

production de chaleur et repart sur les lignes aller du réseau. Les conduites sont numérotées de 1 à 5, respectivement de la production vers les consommateurs.



Figure 1 : Réseau de chaleur d'étude sous le logiciel DistrictLab-H Simulation Studio

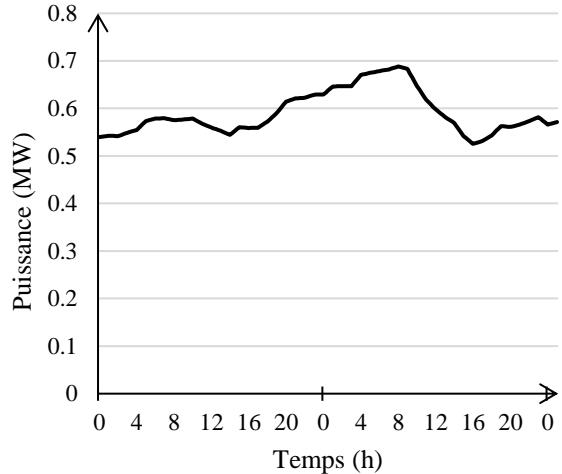


Figure 2 : Profil de demande des consommateurs

Ce réseau est simulé sur deux jours de janvier, représentatifs des périodes de forte demande du réseau. La température extérieure moyenne sur cette période est de -2°C. Tous les consommateurs ont le même profil de demande représenté sur la Figure 2. Les échangeurs au niveau de chaque sous-station sont dimensionnés pour une puissance nominale de 1.4 MW. Les conduites sont dimensionnées pour assurer la demande avec une température de départ de 120°C ce qui donne comme diamètres : D1 = 80 mm, D2 = 65 mm, D3 = D4 = D5 = 50 mm. La valeur minimale de pression différentielle visée aux bornes des sous-stations est de 1 bar et la vitesse maximale du fluide dans les conduites est de 2 m/s.

2.1. Simulation du réseau de chaleur à sa température de dimensionnement (120°C)

Dans un premier temps, le réseau de chaleur est simulé à sa température de dimensionnement soit 120°C. Comme représenté sur la Figure 3 en lignes claires, les vitesses du fluide dans les conduites sont bien inférieures à la limite constructeur de 2 m/s.

2.2. Réduction de la température de départ en-dessous de 100°C

Ensuite, la température de départ est abaissée à 92°C, un niveau de température qui reste supérieur à celui requis côté consommateur pour les besoins en chauffage et eau chaude sanitaire. Les courbes foncées sur la Figure 3 montrent qu'à cette température, les vitesses du fluide dans les conduites 1 et 2 augmentent et dépassent la limite constructeur de 2 m/s.

La solution communément envisagée aujourd’hui sur les réseaux de chaleur pour enrayer cette problématique est d’augmenter le diamètre des conduites critiques. Ainsi, comme indiqué sur la Figure 4, les conduites 1 et 2 sont remplacées par des conduites de diamètre supérieur. Cette solution de mise à niveau permet de diminuer la vitesse du fluide dans les conduites en-dessous de la limite constructeur comme le montre les courbes claires de la Figure 5. Diminuer la température du réseau sur ces deux jours réduit la production de chaleur de 0.32 %. Ceci est le résultat, d’une part, des pertes thermiques dans les conduites qui ont diminué de 19% parce que la température du fluide est plus proche de la température extérieure. D’autre part, des dissipations thermiques au niveau des pompes et des sous-stations qui ont doublé suite à l’augmentation du débit dans les conduites.

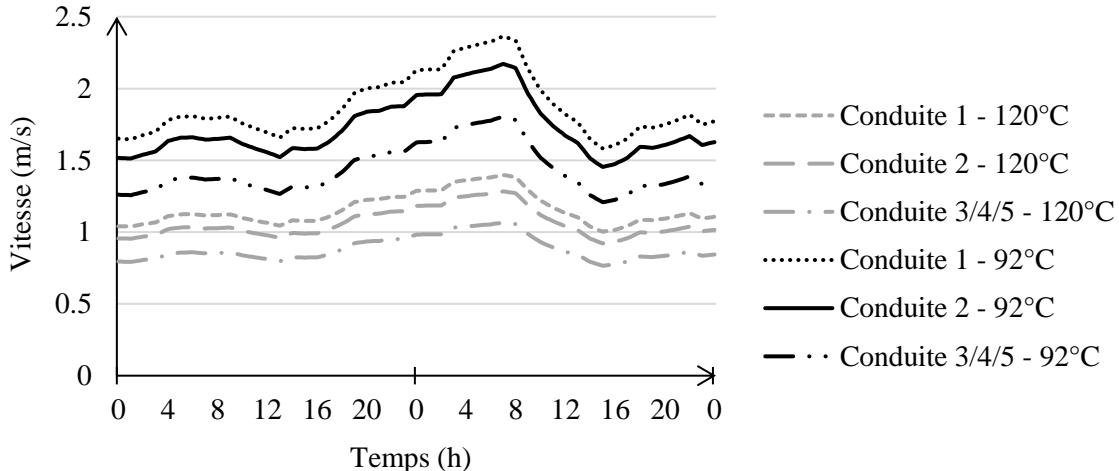


Figure 3 : Vitesses du fluide dans les conduites avec $T_{\text{départ}} = 120^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{départ}} = 92^{\circ}\text{C}$

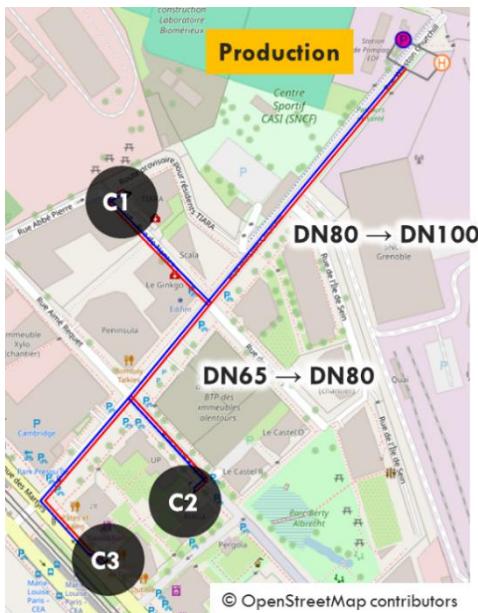


Figure 4 : Remplacement des conduites confrontées à la congestion hydraulique

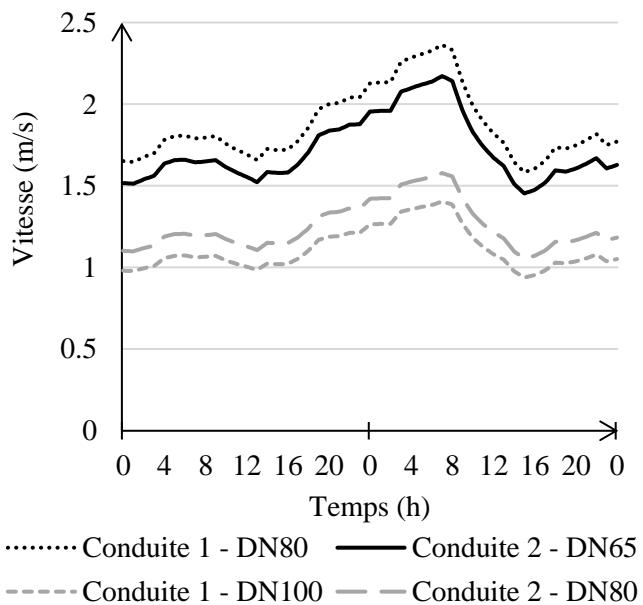


Figure 5 : Vitesse du fluide dans les conduites 1 et 2 avec et sans remplacement des conduites ($T_{\text{départ}} = 92^{\circ}\text{C}$)

2.3. Ajout d'un stockage distribué avec une température de départ de 92°C

Il n'est pas possible, parfois, de remplacer les conduites d'un réseau parce qu'il n'y a pas de place autour pour en installer de plus larges ou parce qu'elles sont en-dessous d'une zone où un travail de génie civil n'est pas possible ou trop coûteux. Une solution alternative est d'intégrer un stockage, dit distribué, à l'extrémité aval des conduites concernées par la congestion hydraulique, comme représenté sur la Figure 6.

Deux pilotages de ce stockage sont testés, l'un en suivi de charge (Pilotage A) et l'autre en créneau (Pilotage B) comme représenté sur la Figure 7. Le pilotage A consiste à charger (resp. décharger) le stockage lorsque le débit dans la conduite amont du stockage est inférieur (resp. supérieur) à la limite constructeur. Les stockages permettent alors d'introduire un retard sur la livraison de la chaleur et ainsi satisfaire la demande en aval du stockage tout en lissant la charge en amont. Le pilotage B suit la même logique mais de manière plus élémentaire, *i.e* par seuil de

débits. Par convention, le débit est positif (resp. négatif) lorsque le stockage se charge (resp. décharge). Pour chaque pilotage, plusieurs volumes de stockage ont été testés afin d'approcher le volume minimal requis. Un volume de 88 m^3 (resp. 115 m^3) a été retenu pour le pilotage A (resp. B). Ces stockages cylindriques ont un isolant de 40 cm d'épaisseur et $0.04 \text{ W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$ de conductivité thermique. Comme le montrent les courbes claires et pointillées sur la Figure 8, la vitesse du fluide dans les conduites 1 et 2 ne dépasse plus les 2 m/s avec ces deux pilotages. Pour précision, la température de la ligne retour du réseau est en moyenne de 48°C . En termes de consommation électrique et production de chaleur, ces deux pilotages sont équivalents, avec une différence de l'ordre de 0.001% . Les pertes thermiques du stockage avec l'extérieur sont de l'ordre de 0.06% et sont compensées par les dissipations thermiques au niveau de la pompe de pilotage du stockage qui sont d'environ 0.07% .

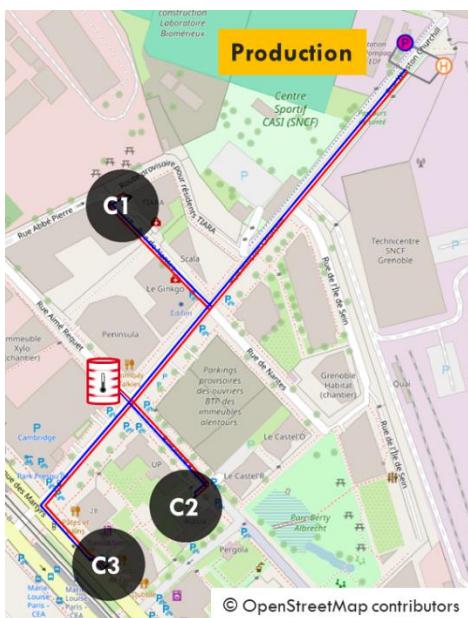


Figure 6 : Ajout d'un stockage à l'extrême de la conduite 2

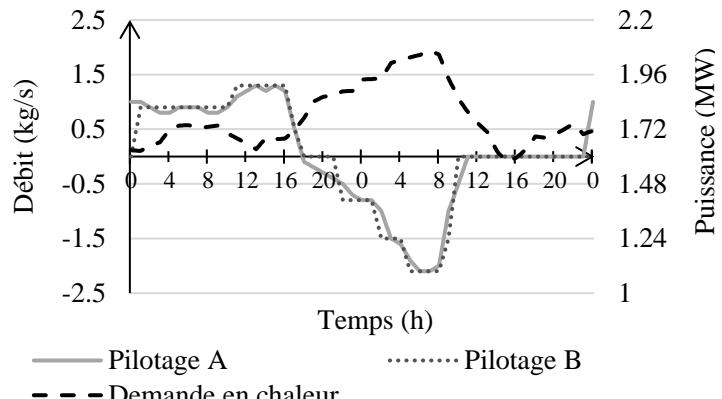


Figure 7 : Pilotages du stockage en fonction de la demande en chaleur

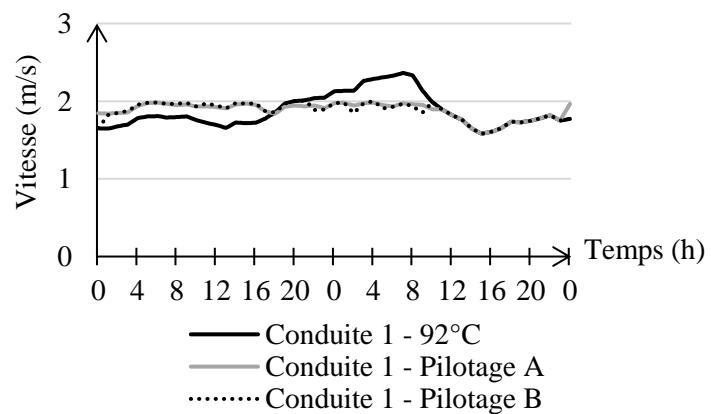


Figure 8 : Vitesse du fluide dans les conduites 1 et 2 avec et sans stockage à l'extrémité de la conduite 2

Enfin, pour conclure ce cas d'étude, il est proposé de regarder l'influence de la localisation du stockage. En effet, lorsque la vitesse du fluide dans les conduites dépasse la limite constructeur, un stockage peut être positionné à l'extrémité aval de cette conduite – comme précédemment – mais il peut être aussi positionné plus loin. Pour cette dernière situation, le réseau de chaleur précédent est légèrement modifié via l'ajout d'un quatrième consommateur pour avoir un réseau symétrique en demande. Les niveaux de demande sont aussi abaissés de manière à ce que lorsque la température de départ est abaissée, la congestion hydraulique apparaisse sur la conduite 1 mais pas sur les deux ramifications suivantes (conduites 2 et 3). Ainsi, une première simulation consiste à placer un stockage à l'extrémité aval de la conduite 1 (stockage 1 sur la Figure 9) et une seconde simulation considère deux stockages aux extrémités aval des conduites 2 et 3 (stockages 2 et 3 sur la Figure 9). Les stockages sont pilotés en suivi de charge et la température de départ est abaissée à 105°C. La Figure 10 confirme que ces deux configurations résolvent la congestion hydraulique observée dans la conduite 1. Ces deux configurations ne requièrent pas le même volume minimal de stockage ni les mêmes quantités de chaleur produite (Tableau 1). En effet, l'ajout de deux stockages plutôt qu'un augmente la surface de contact du fluide chaud avec l'extérieur ce qui génère davantage de pertes thermiques donc la nécessité d'augmenter la production de chaleur pour compenser.

	Stockage 1	Stockage 2 et 3
Production de chaleur (MWh _{th})	114.56	114.71
Volume du stockage (m ³)	68	30 (x2)

Tableau 1 : Production de chaleur et volume des stockages selon la localisation des stockages

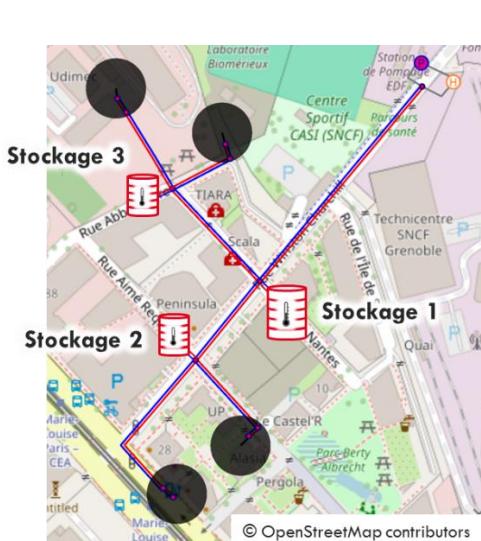


Figure 9 : Variation des localisations de stockage

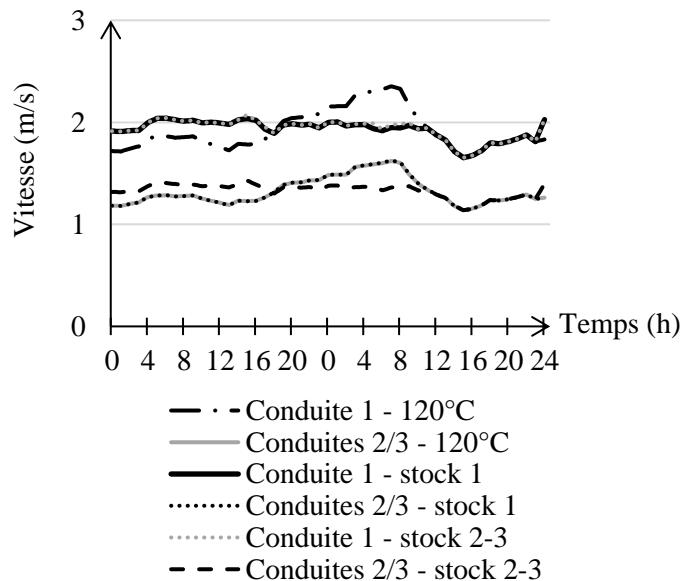


Figure 10 : Vitesse du fluide dans les conduites 1, 2 et 3 selon les localisations des stockages

3. Conclusion

Ces simulations confirment que diminuer la température d'opération d'un réseau de chaleur augmente le débit du fluide dans les conduites parfois au-delà de la limite constructeur. De plus, ces simulations démontrent que ce phénomène de congestion hydraulique peut-être contenu soit par le remplacement des conduites concernées soit par l'ajout de stockages distribués. Comme souligné au fil de l'étude, plusieurs localisations, dimensionnements et

pilotages du stockage distribué sont possibles n’aboutissant pas au même bilan énergétique. Néanmoins, les différences relevées ici sont très faibles car le réseau est de petite taille et la simulation est réalisée sur seulement deux jours. En pratique, les réseaux de chaleur existants confrontés à cette problématique sont plus grands avec des consommateurs aux profils variés soit davantage de configurations possibles pour l’ajout de tels stockages. De futurs travaux consisteront à mettre au point une méthode d’optimisation pour déterminer quels configuration et pilotage de ces stockages seraient les plus pertinents. Cela représente un défi mathématique et numérique de taille puisque le système à optimiser possède un nombre important de variables, des équations fortement non-linéaires et une grande variabilité temporelle.

Références

- [1] IRENA, IEA, and REN21, ‘Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling’, 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition-heating-and-cooling>
- [2] IEA, ‘Renewables 2019, analysis and forecast to 2024’, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>
- [3] S. Frederiksen and S. Werner, *District heating and cooling*, Studentlitteratur. 2013.
- [4] A. Lake, B. Rezaie, and S. Beyerlein, ‘Review of district heating and cooling systems for a sustainable future’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 417–425, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.061.
- [5] H. Lund *et al.*, ‘4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems’, *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [6] H. Lund *et al.*, ‘The status of 4th generation district heating: Research and results’, *Energy*, vol. 164, pp. 147–159, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.206.
- [7] E. Guelpa, M. Capone, A. Sciacovelli, N. Vasset, R. Baviere, and V. Verda, ‘Reduction of supply temperature in existing district heating: A review of strategies and implementations’, *Energy*, vol. 262, p. 125363, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125363.
- [8] B. Mitterrutzner, C. Z. Callegher, R. Fraboni, E. Wilczynski, and S. Pezzutto, ‘Review of heating and cooling technologies for buildings: A techno-economic case study of eleven European countries’, *Energy*, vol. 284, p. 129252, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.129252.
- [9] D. Olsthoorn, F. Haghighat, and P. A. Mirzaei, ‘Integration of storage and renewable energy into district heating systems: A review of modelling and optimization’, *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 49–64, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.06.054.
- [10] H. Li and N. Nord, ‘Transition to the 4th generation district heating - possibilities, bottlenecks, and challenges’, *Energy Procedia*, vol. 149, pp. 483–498, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.213.
- [11] A. M. Jodeiri, M. J. Goldsworthy, S. Buffa, and M. Cozzini, ‘Role of sustainable heat sources in transition towards fourth generation district heating – A review’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 158, p. 112156, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112156.
- [12] R. Wiltshire, ‘Advanced district heating and cooling (dhc) systems’. Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.vlebooks.com/Product/Index/627925>
- [13] H. Gadd and S. Werner, ‘18 - Thermal energy storage systems for district heating and cooling’, in *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, L. F. Cabeza, Ed., in Woodhead Publishing Series in Energy. , Woodhead Publishing, 2015, pp. 467–478. doi: 10.1533/9781782420965.4.467.
- [14] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, ‘An overview of thermal energy storage systems’, *Energy*, vol. 144, pp. 341–378, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037.

- [15] E. Guelpa and V. Verda, ‘Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review’, *Appl. Energy*, vol. 252, p. 113474, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113474.
- [16] O. Angelidis, A. Ioannou, D. Friedrich, A. Thomson, and G. Falcone, ‘District heating and cooling networks with decentralised energy substations: Opportunities and barriers for holistic energy system decarbonisation’, *Energy*, vol. 269, p. 126740, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126740.
- [17] T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis, J. Van Bael, and D. Six, ‘Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating’, *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 583–591, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.029.
- [18] G. Baccino, S. Cosentino, E. Guelpa, A. Sciacovelli, and V. Verda, ‘Reduction of Primary Energy Consumption Through Distributed Thermal Storage in Buildings Connected With a District Heating Network’, presented at the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Mar. 2015. doi: 10.1115/IMECE2014-39048.
- [19] E. Bellos *et al.*, ‘Dynamic investigation of centralized and decentralized storage systems for a district heating network’, *J. Energy Storage*, vol. 56, p. 106072, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.106072.
- [20] Y. Ju, J. Jokisalo, and R. Kosonen, ‘Peak Shaving of a District Heated Office Building with Short-Term Thermal Energy Storage in Finland’, *Buildings*, vol. 13, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/buildings13030573.
- [21] S. Paulick, V. Boß, and C. Felsmann, ‘About the Efficiency of District Heating with flexible Heat and Temperature Distribution’, 2022, [Online]. Available: <https://proceedings.ises.org/conference/eurosun2022/EuroSun2022-Proceedings.pdf>
- [22] M. Rämä, E. Pursiheimo, D. Sundell, and R. Abdurafikov, ‘Dynamically distributed district heating for an existing system’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 189, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.113947.
- [23] C. Johansson, F. Wernstedt, and P. Davidsson, ‘Distributed thermal storage using multi-agent systems’, presented at the CEUR Workshop Proceedings, 2012, pp. 423–437. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:834673/FULLTEXT01.pdf>
- [24] D. F. Dominković, P. Gianniou, M. Münster, A. Heller, and C. Rode, ‘Utilizing thermal building mass for storage in district heating systems: Combined building level simulations and system level optimization’, *Energy*, vol. 153, pp. 949–966, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.04.093.
- [25] R. Roberto, R. D. Iulio, M. D. Somma, G. Graditi, G. Guidi, and M. Noussan, ‘A multi-objective optimization analysis to assess the potential economic and environmental benefits of distributed storage in district heating networks: a case study’, *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.*, vol. 20, Apr. 2019, doi: 10.5278/ijsepm.2019.20.2.
- [26] Y. Zhang, P. Johansson, and A. S. Kalagasidis, ‘Applicability of thermal energy storage in future low-temperature district heating systems – Case study using multi-scenario analysis’, *Energy Convers. Manag.*, vol. 244, p. 114518, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114518.
- [27] J. Röder, B. Meyer, U. Krien, J. Zimmermann, T. Stührmann, and E. Zondervan, ‘Optimal Design of District Heating Networks with Distributed Thermal Energy Storages – Method and Case Study’, *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.*, vol. 31, pp. 5–22, May 2021, doi: 10.5278/ijsepm.6248.
- [28] R. Baviere, M. Vallee, S. Crevon, N. Vasset, and N. Lamaison, ‘DISTRICTLAB-H: A new tool to optimize the design and operation of district heating and cooling networks’, presented at the DHC Symposium 2023 - The 18th International Symposium on District Heating and Cooling, Sep. 2023. Accessed: Jul. 22, 2024. [Online]. Available: <https://cea.hal.science/cea-04247969>