

La chaleur et le froid dans la transition énergétique.

Heating and cooling in the energy transition.

Thierry de LAROCHELAMBERT^{1*}

¹Institut FEMTO-ST, Département Energie
2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort.

* (auteur correspondant : thierry.larochelambert@femto-st.fr)

Résumé – L'analyse de la structure énergétique française permet de comprendre ses faiblesses actuelles, en comparaison avec celle d'un des pays européens les plus efficaces. Elle fait ressortir l'incohérence structurelle du rôle assigné à la chaleur dans la politique énergétique de la France depuis des décennies, quand la chaleur devrait au contraire être la colonne vertébrale de la transition énergétique de la France et de l'Europe vers un système énergétique efficace, économiquement responsable et écologiquement soutenable, à même de relever le défi de l'urgence climatique.

Basée sur l'efficacité énergétique du concept de *Smart Energy System* mis en œuvre au Danemark, cette contribution souligne la nécessité de structurer très rapidement tout le système français et européen autour des réseaux intelligents de chaleur et de froid locaux couplés aux réseaux électriques et de gaz, associés à la co- et tri-génération et aux stockages multi-échelles de chaleur et d'électricité, afin de garantir la stabilité de chacun et d'assurer l'injection massive et efficace des énergies renouvelables, en s'appuyant sur une véritable sobriété énergétique indispensable à la lutte contre les gaspillages d'énergie et de matériaux.

Mots-clés : transition énergétique ; réseaux de chaleur et de froid ; énergies renouvelables ; cogénération ; trigénération.

Abstract – The analysis of the French energy structure allows to understand its current weaknesses, in comparison with that of one of the most efficient European countries. It highlights the structural inconsistency of the role assigned to heat in France's energy policy for decades, when heat should instead be the backbone of the rapid energy transition of France and all of Europe towards an efficient, economically responsible and ecologically sustainable energy system capable of meeting the challenge of the climate emergency.

Based on the energy efficiency of the *Smart Energy System* concept implemented in Denmark, this paper highlights the need to quickly shape the entire French and European system with smart local district heating and cooling closely connected to electricity and gas networks, associated with mandatory combined heat and power stations along with multi-scale thermal and electric storage, in order to guarantee the stability of each and to ensure the massive and efficient penetration of renewable energy, based on true energy sobriety as an essential lever in the fight against wasting energy and materials.

Keywords: energy transition; district heating and cooling; renewable energy; cogeneration;

1. Introduction

Pour concilier lutte contre le réchauffement climatique, efficacité énergétique et développement économique, les PPE 2019-2028 (Programmation Publique de l'Énergie) soumises au débat public en France du 19 mars au 30 juin 2018, articulées sur la SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone) et les SRADDET (Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires), visaient les objectifs de réduction de 40% des émissions de GES (gaz à effet de serre) de la France d'ici 2030 par rapport à 2012 ; de 50% de la consommation énergétique d'ici 2050 ; de 30% de la consommation d'énergie fossile d'ici 2030 ;

de 50% de la part nucléaire de la production d'électricité en 2025 [1]. Elles ont été réactualisées dans la LOI n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat pour renforcer les objectifs de réduction des consommations fossiles à 40% en 2030 en visant la neutralité carbone en 2050 et en décalant la réduction à 50% de la part d'électricité nucléaire à 2035 [2]. Pour être pertinente, la PPE actuellement en cours d'élaboration doit répondre à la fois aux énormes enjeux de la lutte contre le réchauffement climatique accéléré – qui menace jusqu'à l'habitabilité-même de notre planète à l'horizon du siècle et s'approche du seuil de basculement irréversible – et aux contraintes spécifiques du système énergétique français, caractérisé par une faible efficacité énergétique, une forte dépendance aux importations (en particulier d'énergies fossiles) et une grande sensibilité aux aléas climatiques ou sismiques.

Si le débat public s'est focalisé sur les choix dans la production électrique (renouvelable *versus* nucléaire), il a peu mis en avant le rôle essentiel que la chaleur peut tenir dans la mise en place d'une transition énergétique efficace en France comme dans toute l'Europe.

À la fois *énergie primaire EP* (sous forme de flux de chaleur géothermique et d'éclairage solaire, chaleur fatale), *vecteur d'énergie* (directement dans les réseaux de chaleur, indirectement dans les machines thermodynamiques), *énergie finale EF* (chauffage et climatisation des bâtiments, eau chaude sanitaire, cuisson, chauffage industriel, réfrigération, etc.), *énergie de stock* et *énergie de flux*, la chaleur est aussi à l'intersection des flux énergétiques des économies modernes. De fait, elle doit donc être au cœur de la transition énergie afin de pouvoir sortir très rapidement des énergies fossiles de manière économique et pérenne.

La conscience des choix (« *choice awareness* » [3]) comme fondement d'une politique de la chaleur en France et en Europe est indispensable, tant pour relever les défis des enjeux de sobriété (isolation et rénovation thermiques) et d'efficacité (récupération de chaleur fatale, co- et tri-génération, stockage) énergétiques que ceux de la substitution massive des énergies renouvelables (chaleur solaire, biomasse, biogaz, géothermie) aux énergies fossiles en alliant indépendance et efficacité économique, justice sociale et soutenabilité écologique.

Dans cette perspective, il est essentiel que les statistiques énergétiques et climatiques locales, nationales et européennes soient non seulement transparentes et accessibles tant aux chercheurs qu'au grand public, mais aussi complètes et pertinentes pour permettre la compréhension claire des enjeux. La dénomination « *énergie finale* » elle-même est ambiguë et mal définie : il est par exemple difficile de trouver dans les tableaux statistiques une comptabilité claire de la chaleur dans les bilans d'énergie finale, trop souvent limités à un inventaire marchand (charbon, fioul, gaz naturel, électricité, chaleur vendue par réseaux de chaleur), alors qu'en réalité ces sources d'énergies sont converties pour produire les trois formes finales d'usage (*chaleur* pour les besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de procédés industriels et artisanaux ; *force motrice* pour les besoins de transport ; *électricité spécifique* pour l'électronique, l'éclairage, l'électroménager), seules représentatives des besoins d'énergie.

Après avoir situé la chaleur et le froid dans la structure énergétique européenne et française (section 2), cet article montre l'importance des réseaux de chaleur et de froid pour la transition vers un système énergétique intégré intelligent (section 3) comme celui du Danemark.

2. La chaleur, au cœur des systèmes énergétiques

2.1. Consommations finale et primaire de chaleur et de froid en Europe

À l'échelle européenne, *la chaleur et le froid représentent environ 50% de la consommation d'énergie dite « finale »*, essentiellement pour le *chauffage des bâtiments* (52%), le *chauffage industriel* (30%) et l'*eau chaude sanitaire* (10%) comme le montre la Fig. 1, inéga-

lement répartis selon les secteurs économiques (résidentiel : 45% ; industrie : 37% ; tertiaire : 18%). En particulier, le chauffage des bâtiments représente en moyenne 78% de l'énergie finale du secteur résidentiel et 63% dans le secteur tertiaire, lors que la climatisation n'en représente que 1% dans le résidentiel et 9% dans le tertiaire [4].

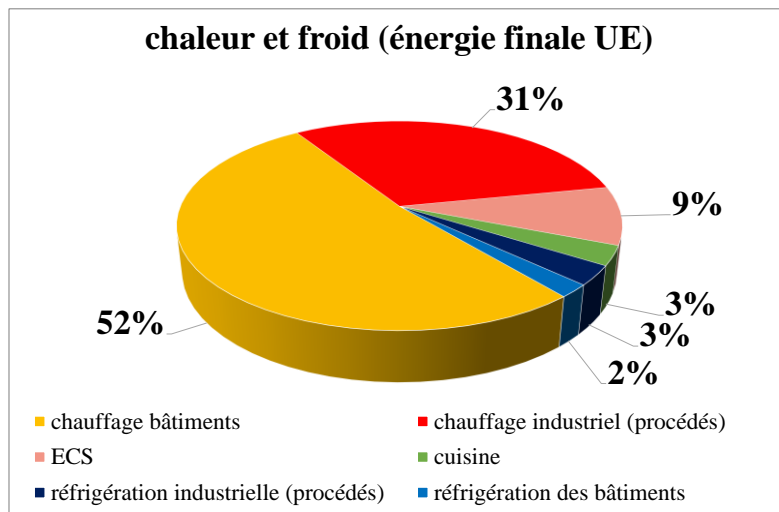


Figure 1 : Utilisations finales de chaleur et de froid (UE 2012) [4]

Cependant, les sources primaires d'énergie finale utilisées pour la chaleur et le froid dans l'UE sont encore à 75% des combustibles d'origine fossile (Fig. 2) : la réduction de ces consommations et leur transition vers les énergies renouvelables est donc un enjeu considérable.

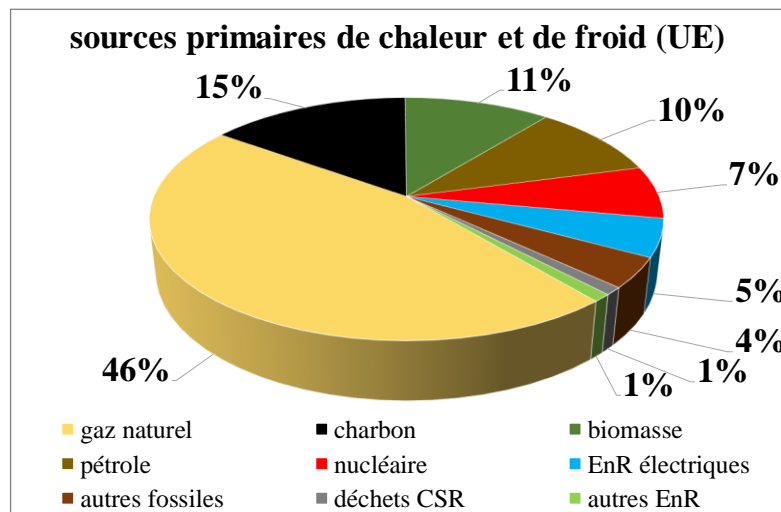


Figure 2 : Sources primaires de chaleur finale et de froid final (UE 2012) [4]

Cette structure évolue lentement vers davantage d'efficacité grâce au développement des réseaux de chaleur et de froid (8% de la consommation finale de chaleur, 1% de celle de froid), de la cogénération et des énergies renouvelables, préconisées par la Commission Européenne pour verdir l'énergie et de diminuer la dépendance énergétique de l'Europe [5]. Entre 2004 et 2016, la part des énergies renouvelables dans la consommation de chaleur et de froid dans l'UE est ainsi passée de 10,3% à 19,1%. Cependant, la chaleur et le froid n'apparaissent généralement pas en tant que tels dans les documents d'orientation stratégique de long terme 2050 de l'UE [6], ce qui traduit un manque de vision globale. De plus, l'absence d'accroissement des réseaux de chaleur dans la stratégie 2050 de l'UE pose de sérieux problèmes d'efficacité dans la lutte contre le réchauffement climatique. La section suivante (2.2) montre que les mêmes questions de données et de structures se posent en France.

2.2. La chaleur et le froid dans la structure énergétique française

La structure énergétique de la France, héritée du centralisme, des infrastructures industrielles d'après-guerre et de la stratégie tout-électronucléaire des années 80, reste encore fragile et défavorable aux synergies efficaces entre formes complémentaires d'énergie :

- les *réseaux de chaleur et de froid* sont très peu développés et ne couvrent que 3,3% de la chaleur finale et 5,5% des besoins de froid [7];
- le *chauffage électrique par effet joule* représente une part disproportionnée du chauffage des locaux (18%), surtout dans les logements individuels et collectifs (31%), alors qu'il est le mode de chauffage le plus coûteux en énergie primaire ($EF/EP : 0,385$; pompes à chaleur : 1,25 à 1,8) et appelle des puissances électriques démesurées (records européens) sur le réseau en pointes hivernales (102 GW le 8 février 2008 ; 90 GW en décembre 2012, janvier 2013 et février 2015 ; 96,6 GW le 28 février 2018, etc.), au prix d'importations électriques au prix fort et de la mobilisation de centrales au charbon et au fioul d'appoint très émettrices en GES ; de plus, il pénalise particulièrement les populations défavorisées ;
- la *cogénération* ne représente que 2,9% de la production électrique en France [8].

Les énergies fossiles couvrent encore près de 62,3 % des sources primaires de chaleur finale (rendement des centrales électriques non compté), ce qui montre le défi à relever (Fig. 3).

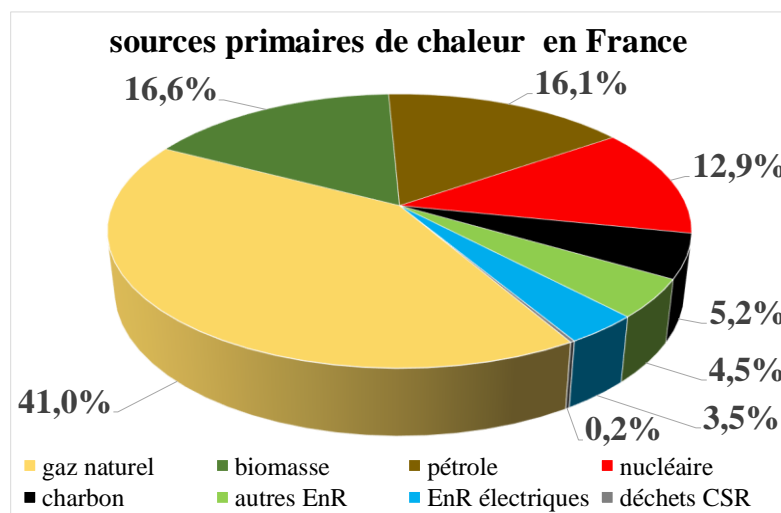


Figure 3 : Sources primaires de chaleur finale (France 2016) [7]

2.3. Comparaisons européennes

Les structures énergétiques des différents pays européens sont très différenciées du fait de leur grande variété politique, historique, géographique et climatique. Il en résulte une grande dispersion de leur efficacité énergétique et de leur avancement en termes de réseaux énergétiques, d'énergies renouvelables, d'économies d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre, particulièrement pour la consommation et la production de chaleur et de froid.

La contribution des réseaux de chaleur et de froid dans la consommation finale de chaleur de chaque pays de l'UE est par conséquent extrêmement variable (Fig. 4). La part couverte par les énergies renouvelables (y compris les déchets renouvelables) dans les réseaux de chaleur augmente régulièrement (Suède 63%, Danemark 60,3%, France 57,1%), mais *la part de la cogénération diffère considérablement* (Danemark 66,2%, France 16,1%) [10][11][12]. Les réseaux de chaleur et de froid seront pourtant l'un des deux principaux leviers pour remplir les objectifs climatiques de l'UE, aux côtés de la mobilité électrique.

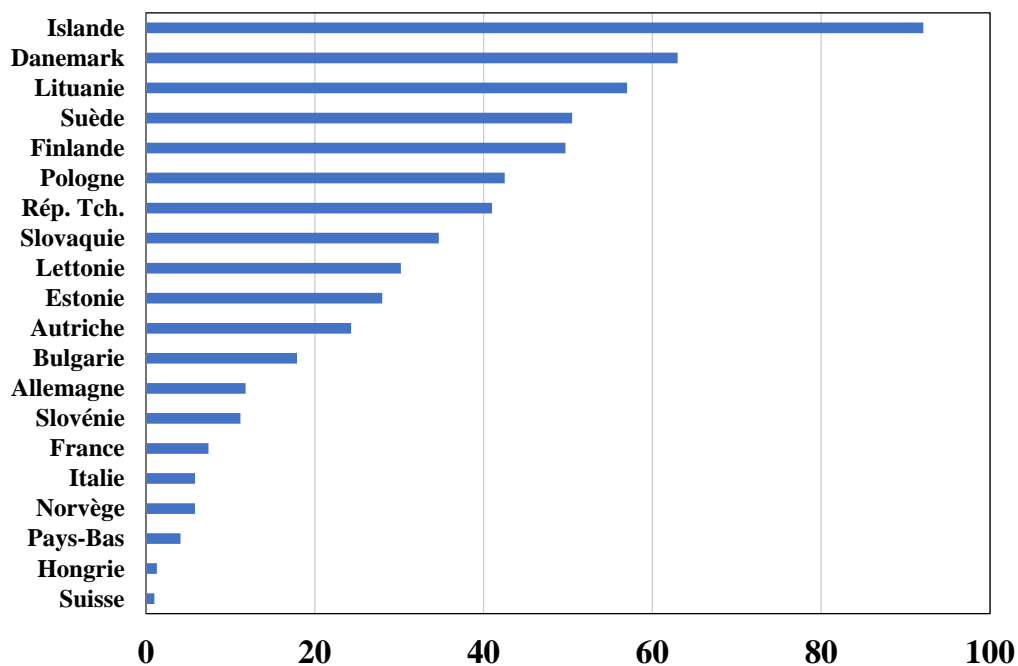


Figure 4 : Fraction de population chauffée par réseaux de chaleur (%), 2017 [9]

3. Les réseaux de chaleur et de froid au cœur de la transition énergétique

Les impératifs climatiques, la sécurité et l'indépendance énergétiques, l'efficacité énergétique et économique requièrent un changement radical des structures énergétique. Les retours d'expérience montrent que les réseaux de chaleur et de froid sont une réponse pertinente à ces objectifs (cf. 3.1) ; ils sont déjà au cœur réseaux de chaleur 4G des *systèmes énergétiques intelligents* (décrits au 3.2), seuls à même de relever ces défis de manière soutenable (cf. 3.3).

3.1. Efficacité énergétique des réseaux couplés de chaleur, de froid et d'électricité

Au cours des dernières décennies, l'efficacité des réseaux de chaleur n'a cessé de croître à mesure que la température de distribution des réseaux de chaleur baissait de 110-150°C (vapeur industrielle) à 40-60°C pour les nouveaux réseaux (Tab. 1). Cette baisse de température a permis le raccordement successif de bâtiments de plus en plus performants, mais aussi la récupération d'une part croissante de la *chaleur fatale* des usines et des compresseurs de groupes réfrigérant ; le raccordement d'unités de *cogénération*, de *pompes à chaleur industrielles*, de *centrales solaires thermiques* basse température, d'unités de *stockage thermique* journalier systématique et désormais de grandes unités de stockage thermique saisonnier.

gén.	fluide	température	sources additionnelles ou substituées	stockage/régulation
1G	vapeur	110-150°C	grandes centrales thermiques fossiles	24h - vapeur
2G	eau pression	100-110°C	grande cogénération fossile, UVE	24h - eau chaude
3G	eau (tube dur pré-isolé)	80-90°C	cogénérations biomasse-biogaz, centrales solaires, chaleur fatale	7 j - eau chaude / compteurs intelligents
4G	eau (double-tube souple pré-isolé)	40-60°C	trigénération, PAC géothermales, surplus EnR électriques variables, réseau bidirectionnel, réseau H ₂ , VER	6 mois - eau chaude / 6 mois - eau froide / pilotage optimisé

Tableau 1 : Évolution des générations de réseaux de chaleur [13] (UVE : unité de valorisation énergétique des déchets, VER, véhicules électriques rechargeables)

L'efficacité élevée des réseaux 3G par rapport aux générations 1G et 2G est due :

- à l'*abaissement de température* du fluide caloporteur, l'*isolation thermique* accrue et maîtrisée des tubes d'acier préfabriqués et des raccords ;
- au raccordement généralisé des *centrales de cogénération* gaz, d'incinération des CSR (combustibles solides de récupération) et des déchets ménagers renouvelables; des *unités de cogénération décentralisées* alimentées en biomasse locale (plaquettes bois, paille) ;
- à la récupération des *rejets de chaleur industrielle* de moyenne et de basse température.

De fait, le rendement global élevé des unités de cogénération induit systématiquement la baisse de consommation d'énergie primaire globale et celle des émissions de GES, surtout en approvisionnement biomasse et biogaz. Il atteint en moyenne 73 à 77% dans les réseaux de chauffage en France [12] et jusqu'à 92% au Danemark [14], très avancé dans ce domaine.

3.2. Les réseaux de chaleur 4G, vers l'intégration massive des énergies renouvelables

Le saut quantitatif radical d'efficacité opéré par les réseaux de chaleur 4G est entièrement lié à l'intégration complète des réseaux de chaleur et de froid au *Système Energétique Intelligent (Smart Energy System, SES)* décrit en [15], dans lequel ils sont couplés aux réseaux de froid, de gaz et d'électricité, aux réseaux de mobilité électrique collective et individuelle, assurant l'*injection massive et prioritaire des énergies renouvelables* – qu'elles soient à flux variable (éolien, solaire photovoltaïque, solaire thermique surtout ; houlomotrice, hydraulique au fil de l'eau et hydrolien dans une moindre mesure) ou de stock pilotable (hydraulique de barrage, géothermie, biomasses) – par le biais de *pompes à chaleur industrielles* haute performance à très faible taux de fuite, de *stocks journaliers d'eau chaude et de froid* (réseaux de chaleur et de froid), et de *stocks saisonniers de chaleur et de froid* de grande capacité alimentés en *énergie solaire thermique*, plus compétitive que toute autre source thermique.



Figure 5 : Stockage solaire thermique saisonnier du réseau de chaleur de Silkeborg (DK) [14]

De fait, la connexion de *grandes centrales solaires thermiques* au sol (ou en toiture) est un atout considérable pour la compétitivité des installations de chauffage urbain et la coupure drastique des émissions de GES. Le Danemark, malgré sa latitude élevée, construit ainsi les plus grandes installations de stockage solaire thermique saisonnier au monde : Dronninglund (37573 m², 62000 m³, 40-50% du chauffage annuel), Silkeborg (156694 m², 64000 m³, 20% du chauffage annuel), Vojens (70000 m², 205000 m³, 45% du chauffage annuel), etc. [14]. La France commence à suivre cette voie avec succès (Narbonne, Pons, Chateaubriant, etc.).

Dans le SES, les *excédents d'énergie électrique renouvelable variable* peuvent ainsi être convertis en chaleur et froid dans les réseaux grâce aux pompes à chaleur à compression ou

absorption, ou stockés dans les réservoirs de chaleur et de froid à de très faibles coûts. De même, les *surplus de chaleur industrielle ou de froid industriel* sont injectés directement dans les réseaux de chaleur et de froid ou stockés selon les besoins et les saisons. Il en résulte une forte économie de biomasse pour les unités de cogénération utilisées en énergie de back-up, et une diminution drastique des investissements dans le renforcement du réseau électrique [16].

L'efficacité et la flexibilité des réseaux de chaleur 4G dans le SES est particulièrement optimisée grâce au déploiement des compteurs intelligents de chaleur, de froid, d'électricité, d'eau et de gaz pour la lecture et la gestion locales par les fournisseurs et les utilisateurs (au Danemark, les réseaux sont publics et décentralisés depuis la loi thermique de 1979).

3.3. Comparaison smartgrids - système énergétique intelligent

Dans leur principe initial, les *Smartgrids* gèrent et tentent d'optimiser séparément les réseaux d'électricité et de chaleur, sans pouvoir utiliser les synergies complètes de conversion, d'intégration et de stockage inhérentes au *Smart Energy System*. En particulier, ils ne permettent pas de récupérer massivement la chaleur et le froid industriels fatals, ni d'injecter massivement les énergies renouvelables pourtant les plus efficaces pour couper les émissions de GES et les plus compétitives pour la production de chaleur basse température et d'électricité.

Contrairement aux *Smartgrids*, les SES peuvent convertir de grandes quantités d'énergie renouvelables variables sans devoir les stocker trop massivement chaque jour pour faire face aux variations journalières de l'éolien et du PV et de la demande du réseau électrique. Seule, *l'intégration des réseaux électriques avec les réseaux de chaleur et de froid jusqu'aux zones à faible densité urbaine au sein du SES avec ses stockages décentralisés* (y compris les VER) rend possible l'injection massive de l'ensemble des énergies renouvelables [17].

La modélisation comparée des réseaux intelligents séparés (*Smartgrids*) et du SES, récemment appliquée au cas du Danemark [18], permet de quantifier les investissements nécessaires pour assurer la couverture 100% renouvelable, heure par heure, des besoins énergétiques du pays à l'horizon 2050, objectif officiel des gouvernements et parlements danois depuis l'accord sur l'énergie (*Energiaftale*) de 2012. Elle montre que, même en excluant les coûts d'investissement de stockage, les coûts d'investissements dans les réseaux sont pratiquement du même ordre pour les deux, mais ils sont considérablement réduits pour le SES par rapport aux *Smartgrids* si l'on inclut les coûts de stockage prohibitifs des *Smartgrids*.

4. Conclusion

L'application du concept de SES dans la définition de la feuille de route de l'Union Européenne pour la chaleur et le froid [5] conduit à la nécessité d'accroître la part des réseaux de chauffage à 50 % de la demande totale de chaleur d'ici 2050, dont 25 à 30% devront être couverts par de grandes pompes à chaleur industrielles à haut rendement, l'ensemble de la chaleur, du froid, de l'électricité et de la mobilité pouvant être assuré quasi-intégralement par les énergies renouvelables dont le potentiel représente plusieurs centaines de fois la consommation de l'UE. C'est à cette condition que l'UE sera en mesure de remplir ses obligations de réduction drastique de ses émissions gaz à effet de serre.

La France devrait pouvoir couvrir entre 26 et 60% des besoins de chaleur et de froid par le SES d'ici 2050, et les objectifs de la PPE 2028 (plus de 14% de la chaleur couverte par énergies renouvelables et de récupération) pourraient être revus fortement à la hausse avec un développement plus ambitieux des réseaux de chaleur et de froid (surtout industriel et tertiaire) en s'appuyant sur le Fond Chaleur. Outre la fermeture rapide des quatre dernières centrales électrothermiques à charbon et la reconversion immédiate aux EnR&R des neuf réseaux de

chaleur à charbon et des 183 réseaux de chaleur à fioul encore en activité, les investissements devraient être orientés en priorité vers la connexion des réseaux de chaleur et de froid au réseau électrique à travers les pompes à chaleur industrielles, la co- et tri-génération à biomasse-biogaz, la chaleur solaire et géothermique BT, MT et HT, l'élimination du chauffage électrique, en parallèle à l'injection massive des EnR électriques et à la migration des transports individuels et collectifs des combustibles fossiles vers l'électrique et la mobilité douce.

Références

- [1] [LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte](#)
- [2] <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2019/11/8/2019-1147/jo/texte>
- [3] Henrik Lund, Choice awareness : the development of technological and institutional choice in the public debate of danish energy planning, *Journal of Environmental Policy & Planning* 2 (2000), 249-259.
- [4] European Commission, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an EU Strategy for Heating and Cooling*, Bruxelles, 16/02/2016.
- [5] Heat Roadmap Europe 4. Quantifying the Impact of Low-Carbon Heating and Cooling Roadmaps, S. Paardekooper, R.S. Lund, B.V. Mathiesen, M. Chang, U.R. Petersen, L. Grundahl, U. Persson, European Union's Horizon 2020 Project Nr 695989, Aalborg Universitetsforlag (2018).
- [6] European Commission, *A Clean Planet for all - A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*, Bruxelles, 28/11/2018.
- [7] Stratégie française pour l'énergie et le climat. Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2023 2024-2028, Ministère de la transition écologique et solidaire, France, 2018.
- [8] Commissariat Général au Développement Durable, *Bilan énergétique pour la France 2018*, Ministère de la transition écologique et solidaire, France, janvier 2018.
- [9] Country by country 2017, Euroheat & Power (2017).
- [10] Energy in Sweden - Facts and Figures 2018, Swedish Energy Agency.
- [11] Energy statistics 2018, Danish Energy Agency.
- [12] FEDENE-SNCU, *Enquête annuelle sur les réseaux de chaleur et de froid – Chiffres clés, analyses et évolution* (2019).
- [13] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J.E. Thorsen, F. Hvelplund, B.V. Mathiesen, Review - 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, *Energy* 68 (2014) 1-11.
- [14] District Energy - Energy Efficiency for Urban Areas, State of Green, March 2018, <https://stateofgreen.com/en/publications/district-energy/>
- [15] H. Lund, *Renewable energy systems: a smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions*, Academic Press (second ed. 2014)
- [16] B.V. Mathiesen, H. Lund, D. Connolly, H. Wenzel, P.A. Østergaard, B. Möller, S. Nielsen, I. Ridjan, P. Karnøe, K. Sperling, F.K. Hvelplund, Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions, *Applied Energy* 145 (2015) 139-154.
- [17] H. Lund, P. Østergaard, D. Connolly, I. Ridjan, B.V. Mathiesen, F. Hvelplund, J. Thellufsen, Pe. Sorknæs, Energy Storage and Smart Energy Systems, *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* Vol. 11 2016.
- [18] H. Lund, Renewable heating strategies and their consequences for storage and grid infrastructures comparing a smart grid to a smart energy systems approach, *Energy* 151 (2018) 94-102.