

LES RÉSEAUX DE CHALEUR AU DANEMARK

CARNET DE VOYAGE



A Copenhague, près de 98% des bâtiments sont chauffés par un réseau de chaleur. (Photo : Bob de Pixabay)

PRÉAMBULE

Cette publication s'appuie sur deux voyages d'études réalisés au Danemark auxquels le Pôle réseaux de chaleur et de froid du Cerema a participé :

- L'un organisé par l'Ambassade du Danemark à Paris et par Danish Board of District Heating (DBDH) les 26 et 27 septembre 2022 ;
- L'autre organisé par l'entreprise NewHeat les 27 et 28 septembre 2023.

Il s'agit ici de présenter le contexte danois dans lequel le développement des réseaux de chaleur a pu s'opérer.

En complément, des exemples de réseaux de chaleur viennent illustrer le propos en s'appuyant sur les différents sites visités pendant les voyages d'études. Deux focus sont réalisés, l'un sur les installations solaires alimentant les réseaux de chaleur et l'autre sur le stockage thermique à grande échelle qui font, entre autres, la spécificité des réseaux de chaleur danois.



Vue de Copenhague (Source : Freepik)

Partie I

CONTEXTE DANOIS DES RÉSEAUX DE CHALEUR

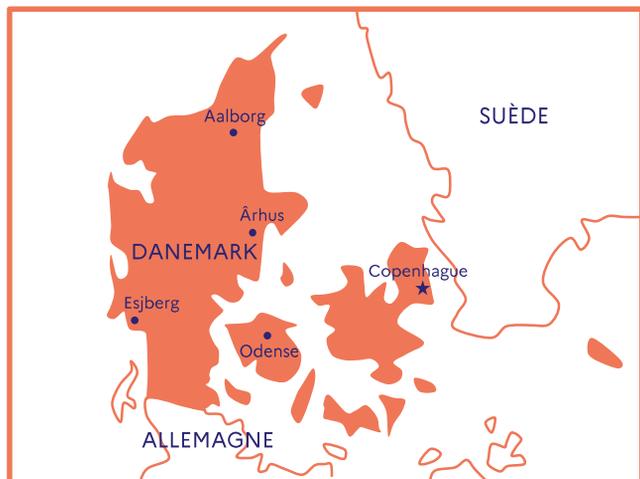


Présentation	p.3
Un peu d'histoire	p.4
Les politiques énergétiques des années 1970 et 1980	p.6
Caractéristiques des réseaux de chaleur danois	p.8



PRÉSENTATION

LE RÉSEAU DE CHALEUR, LA PIERRE ANGULAIRE DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DANOIS



Les réseaux de chaleur sont un élément structurant du système énergétique danois. S'ils permettent de valoriser massivement les énergies renouvelables thermiques [chaleur fatale issue de l'industrie, des déchets, géothermie, solaire, biomasse] pour le chauffage des bâtiments, ils offrent également une flexibilité au système électrique danois [alimenté en grande partie par des énergies renouvelables intermittentes avec l'éolien notamment], en ayant recours à la cogénération, aux pompes à chaleur à grande échelle, mais aussi au stockage thermique ... avec en visée une stabilité des prix de l'énergie dans le temps.

QUELQUES CHIFFRES SUR LES RÉSEAUX DE CHALEUR



1903 premier réseau de chaleur danois

En France, les premiers réseaux de chaleur ont vu le jour dans les années 1930.



Près des **2/3** des bâtiments sont raccordés à un réseau de chaleur (98% à Copenhague)

En France, 1/10 du parc bâti est raccordé.



Plus de **50%** du chauffage est assuré par les réseaux de chaleur.

En France, c'est dix fois moins.



Plus de **35 TWh** de chaleur livrés par les réseaux.

Les réseaux français livrent 26 TWh.



65% d'énergie renouvelable et de récupération dans les réseaux de chaleur danois en moyenne (avec un objectif à 80% d'ici 2030).

Ce taux est équivalent à celui des réseaux français avec plus de 66%.

QUELQUES ÉLÉMENTS DE REPÈRES



5,8 millions d'habitants
43 000 km²
135 habitants / km²



67,8 millions d'habitants
552 000 km²
119 habitants / km²

UN PEU D'HISTOIRE

1900

1903 : il était une fois à Frederiksberg...

Le développement rapide de cette municipalité indépendante située dans la partie ouest de Copenhague au cours de XIXème siècle entraîne une production importante de déchets à gérer. S'inspirant de l'exemple d'Hambourg, la municipalité de Frederiksberg décide au printemps 1902 de construire la première usine d'incinération de déchets du Danemark, produisant non seulement de la chaleur mais aussi de l'électricité. L'usine est inaugurée en septembre 1903. Dès l'hiver suivant, le chauffage urbain est mis en service. Sous forme de vapeur, la chaleur est acheminée vers l'hôpital nouvellement construit, un foyer pour enfants et un hospice.

LE CHAUFFAGE URBAIN DANOIS, UNE HISTOIRE LONGUE DE PLUS D'UN SIÈCLE ...



« Il y a plus de 100 ans, les déchets quotidiens étaient collectés et transportés en calèche jusqu'à l'usine d'incinération. »
Source : Danish Board of District Heating (dbdh.dk)



« La première usine d'incinération de déchets et de cogénération au Danemark, inaugurée en 1903, sert aujourd'hui de centre culturel »
Source : Danish Board of District Heating (dbdh.dk)

Un exemple inspirant qui essaie dans les années 1920

L'exemple de Frederiksberg inspire d'autres municipalités danoises. Ainsi, au début des années 1920, plusieurs centrales électriques au fioul voient la jour avec une valorisation de la chaleur excédentaire pour chauffer les clients les plus proches, principalement des bureaux et des habitations.

1920

1940

Des centrales de production qui évoluent dans les années 1940 et 1950 suite à la Seconde Guerre Mondiale

Pendant la Seconde Guerre mondiale, le manque de fioul conduit certains propriétaires de centrales de production à mettre en place un chauffage d'appoint utilisant d'autres combustibles. Quand l'approvisionnement en fioul revient à la normale, ces installations représentent une capacité excédentaire, permettant l'extension des réseaux de distribution de chaleur.

La période de l'après-guerre voit également une évolution de la structure de l'approvisionnement électrique. De grandes centrales électriques sont créées au détriment des nombreuses centrales locales qui ferment, rendant nécessaire la construction d'usine de production de chaleur afin d'alimenter les systèmes de chauffage urbain déjà en place.

1960

Le progrès technique des années 1960

Au début des années 1960, le Danemark a plus de 50 ans d'expérience dans l'utilisation du chauffage urbain. Des évolutions s'opèrent sur les réseaux avec notamment la diminution du régime de température ou l'évolution des canalisations pour améliorer la performance des réseaux.

Ces changements entraînent un boom dans la création de réseaux de chauffage urbain et d'usines d'incinération des déchets.

Les crises énergétiques des années 1970

Les crises énergétiques des années 1970 font évoluer le système énergétique danois. A cette époque, la consommation d'énergie par habitant est extrêmement élevée et le pays importe près de 100% de ces combustibles nécessaires à la production de chaleur et d'électricité. Le chauffage urbain ne fournit de la chaleur qu'à environ 30% des ménages. Le gouvernement danois est donc contraint de mettre en place des mesures pour économiser l'énergie et limiter sa dépendance énergétique (cf. focus sur la planification thermique). Ces initiatives donnent des résultats considérables. Ainsi, au début du XXIe siècle, les besoins énergétiques pour le chauffage des locaux chutent d'un peu plus de 50 % par rapport aux besoins d'avant crise.

1970

1980

La planification thermique des années 1980

En 1979, après plusieurs crises énergétiques, une loi sur l'approvisionnement en chaleur est mise en œuvre. Elle lance un processus de planification dans les municipalités pour notamment augmenter la part de marché du chauffage urbain (jusqu'à près de 60% dans les années 2000) et remplacer les chaudières individuelles au fioul. Les collectivités ont ainsi la possibilité de définir les zones de leur territoire les mieux adaptées pour développer un réseau de chauffage urbain, puis rendre obligatoire le raccordement des habitations nouvelles et existantes dans ces zones.

Quelles évolutions dans les territoires ?

**DANS LES GRANDES VILLES**

Les anciens secteurs disposant de leur propre approvisionnement en chaleur se regroupent au sein de grandes zones dans lesquelles la chaleur produite de manière centralisée (par des unités de cogénération, des industries...) est distribuée sur l'ensemble du territoire par des réseaux.

**DANS LES ZONES RURALES** (de seulement 250 à 500 habitants)

Des centrales de cogénération dites décentralisées sont créées. Elles sont conçues en fonction de la demande de chaleur et connectées au réseau électrique. Ces systèmes équipés généralement de stockage ne fonctionnent que lorsque la demande en chaleur l'exige. Les productions d'électricité et de chaleur peuvent ainsi être contrôlées et optimisées. Ces installations sont alimentées au gaz naturel, à la paille, au bois, au biogaz ou à d'autres combustibles locaux.

LES POLITIQUES ÉNERGÉTIQUES DANOISES DES ANNÉES 1970 ET 1980

Suite aux chocs pétroliers des années 1970, le Danemark met en place plusieurs mesures afin de limiter sa dépendance énergétique face aux importations de combustibles fossiles.



Une **PLANIFICATION** systématique de l'approvisionnement en chaleur dans les territoires.
→ Instauration de la loi de 1979.



Le développement important de la **COGÉNÉRATION**.
→ La production électrique du Danemark est essentiellement thermique. La cogénération est très développée. Elle représente 80% de l'énergie des réseaux de chaleur et plus de 50% de l'électricité produite dans le pays.



L'ISOLATION des bâtiments.

→ Cette mesure a permis de réduire de près de 50% les besoins énergétiques pour le chauffage des locaux.



Le développement du **CHAUFFAGE URBAIN**.

→ L'objectif est d'augmenter la part de marché du chauffage urbain pour atteindre jusqu'à 60% dans les années 2000. Les réseaux de chauffage urbain sont majoritairement alimentés par les incinérateurs de déchets et les grandes centrales de cogénération.

FOCUS SUR LA PLANIFICATION ÉNERGÉTIQUE

En 1979, après plusieurs crises énergétiques, une loi est mise en œuvre pour planifier l'approvisionnement en chaleur des territoires. En tant que responsable de la planification énergétique locale, les collectivités ont la possibilité de définir un zonage identifiant les modes de chauffage les plus adaptés (chauffage urbain, réseau de gaz, système individuel).

Le raccordement des habitations nouvelles et existantes dans ces secteurs peut ensuite être rendu obligatoire.

Par ailleurs, depuis 1988, une loi nationale interdit le chauffage électrique dans tous les bâtiments situés dans des zones définies pour un chauffage par un réseau de chaleur ou par un réseau de gaz naturel.

Depuis l'actualisation de la loi en 1990, la planification se déroule en 3 ÉTAPES :

1

Délimitation d'une zone et définition de son mode de chauffage.

2

Réalisation de l'infrastructure.

3

Définition éventuelle d'une obligation de raccordement.

A noter : En matière de réseaux de chaleur, l'étape n°2 n'est pas obligatoirement réalisée par la collectivité ; si un tiers souhaite réaliser l'infrastructure (coopérative d'usagers en particulier), il peut le faire.

FOCUS SUR LA PLANIFICATION ÉNERGÉTIQUE (suite)

Cette planification permet ainsi de définir des zones à moindre coût pour le développement des réseaux de chauffage urbain et de gaz naturel en remplacement des chaudières au fioul.

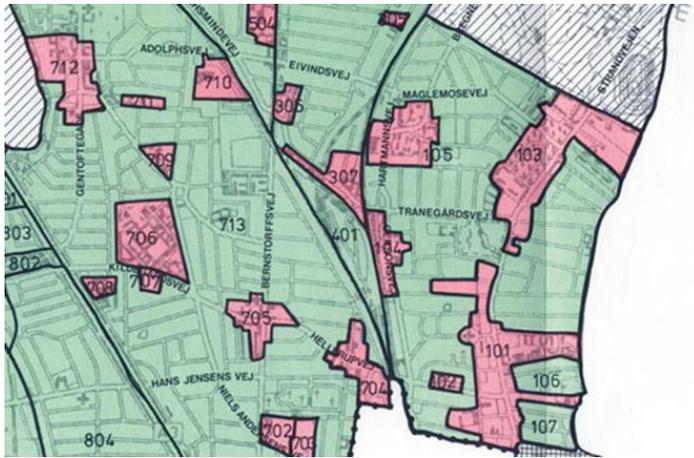
LES OBJECTIFS VISÉS



REEMPLACER les systèmes de chauffage au **FIOUL**.

AUGMENTER la part de marché du **CHAUFFAGE URBAIN**, jusqu'à 60% dans les années 2000.

COUVRIR 15% de la chaleur consommée par du **GAZ** naturel.



« Exemple de zone de moindre coût entre le réseau de gaz des maisons individuelles (vert) et l'approvisionnement en chauffage urbain des grands bâtiments (rouge) »
Source : Danish Board of District Heating (dbdh.dk)

En 1977, une taxe est créée sur le pétrole, l'électricité et le charbon, contribuant à rendre économiquement viables les investissements dans les réseaux de chaleur. Les projets de développement de réseaux de chaleur (extensions, raccordement de nouveaux logements, introduction de nouvelles sources énergétiques) bénéficient par ailleurs de subventions entre la fin des années 1970 et le début des années 2000.

Ce plan national du Danemark signifie également que le coût de la construction de l'infrastructure de chauffage est supporté par la ville dans son ensemble. Les coûts ne sont pas répercutés sur le consommateur final et les fournisseurs de chauffage n'ont pas la possibilité d'augmenter les prix pour générer des bénéfices (logique de non-profit). L'industrie danoise du chauffage urbain est régie comme un monopole naturel de sorte que les clients ne soient pas facturés plus que ce qu'il leur en coûte. Les bénéfices liés au réseau de chaleur sont donc limités.

En effet, en application d'un principe en vigueur au Danemark depuis les années 1950, une collectivité n'est pas autorisée à tirer des bénéfices de ses services publics pour financer ses compétences obligatoires (concrètement, une ville ne peut pas par exemple financer ses écoles à l'aide des revenus tirés du chauffage urbain).

Comme les réseaux de chaleur danois sont soit des réseaux de collectivités, soit des réseaux de coopératives d'utilisateurs (dont l'objectif principal est la fourniture d'un service au meilleur coût), l'ensemble du secteur du chauffage urbain est à but non lucratif. Ceci joue un rôle déterminant dans l'acceptation sociale du chauffage urbain et du monopole local qui y est associé.

EN BREF

Au Danemark, le prix de la chaleur est régulé pour deux raisons principales :

- les réseaux de chauffage urbain sont considérés comme en position de monopole, à but non lucratif ;
- la planification énergétique en matière de chaleur réduit la concurrence entre les différentes énergies.

CARACTÉRISTIQUES DES RÉSEAUX DE CHALEUR DANOIS

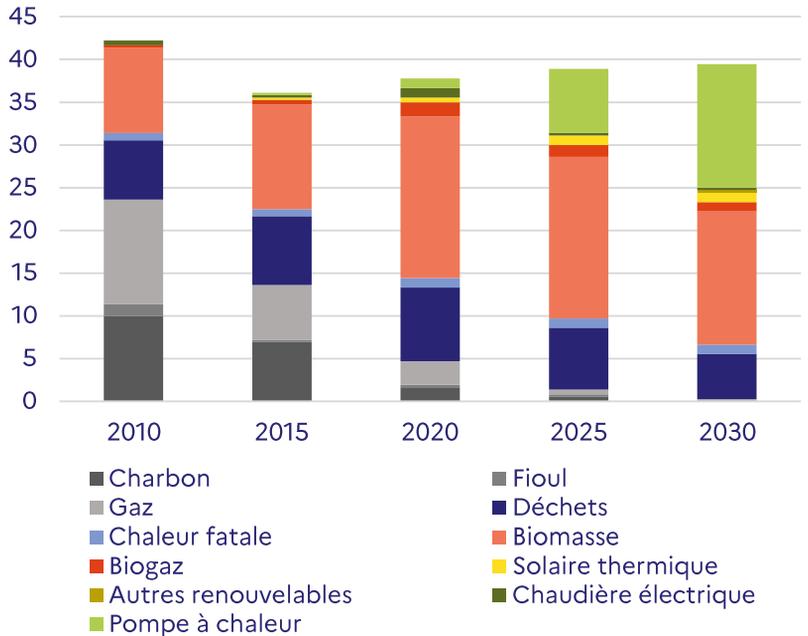
65% D'ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DE RÉCUPÉRATION (ENR&R)

Le taux d'EnR&R sur les réseaux danois atteint presque 65% avec une part importante de biomasse et de chaleur fatale issue de l'incinération des déchets, mais également la forte présence du solaire thermique avec 1 GW installé.

L'objectif d'ici 2030 est de réduire la dépendance aux combustibles fossiles (notamment charbon et fioul) et de diminuer progressivement le gaz naturel au profit du chauffage urbain ou des pompes à chaleur individuelles.

A NOTER : Près des 2/3 de cette chaleur est produite par cogénération (également en majorité à partir de sources comme la biomasse et la chaleur fatale issue d'incinérateurs).

MIX ÉNERGÉTIQUE DU CHAUFFAGE URBAIN DANOIS (en TWh)
Source : Agence danoise de l'énergie



INFO

L'utilisation de la chaleur des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) par les réseaux s'est fortement développée dans les années 1980, suite au développement de l'incinération des déchets en substitution de la mise en décharge ou de l'enfouissement, sous la responsabilité des collectivités locales en charge de la planification énergétique locale.



Amager Bakke, incinérateur de déchets situé à Copenhague (© Google Maps)

UN COUPLAGE ENTRE CHALEUR ET ÉLECTRICITÉ

La production électrique du Danemark est essentiellement thermique et par conséquent la cogénération est très développée.

La forte pénétration des éoliennes dans le mix électrique entraîne une surproduction d'électricité en période de vents forts pouvant fragiliser l'équilibre du réseau. L'excédent d'électricité peut être absorbé par des chaudières électriques de grande capacité ou utilisé pour alimenter des pompes à chaleur à grande échelle pour les systèmes de chauffage urbain.

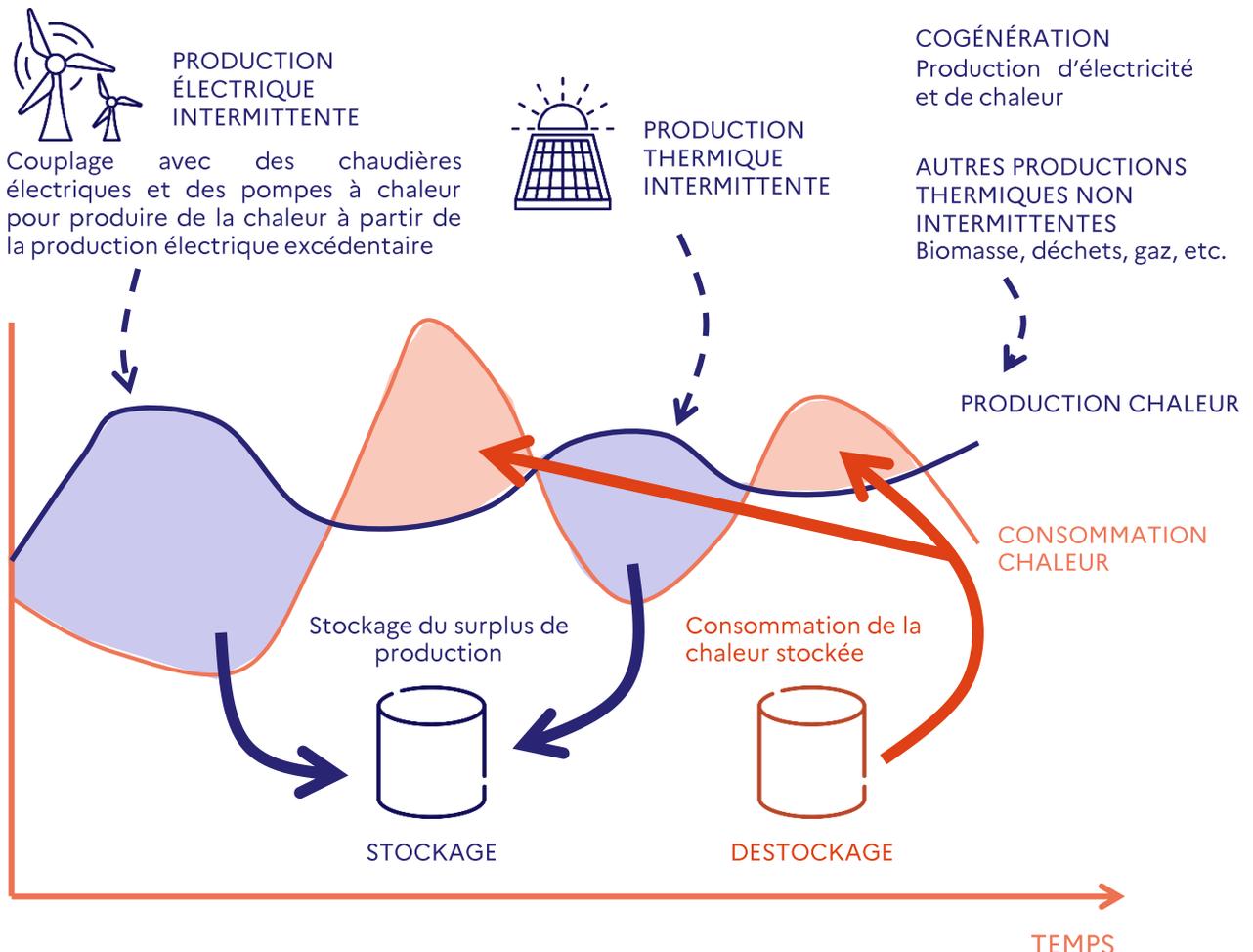
50% DE L'ÉLECTRICITÉ PRODUITE DANS LE PAYS PROVIENT DE LA COGÉNÉRATION.

80% DE L'ÉNERGIE DES RÉSEAUX DE CHALEUR PROVIENT DE LA COGÉNÉRATION.

L'utilisation de stockages de chaleur (journaliers et intersaisonniers) permet également d'optimiser ce couplage entre réseau électrique et réseaux de chaleur en stockant la chaleur si la production est plus élevée que la demande.

Combiné aux installations de cogénération existantes, le chauffage urbain devient donc un « consommateur électrique » en fonction des conditions météorologiques. Les réseaux de chaleur sont ainsi considérés au Danemark comme une infrastructure d'importance stratégique permettant d'offrir de la flexibilité au réseau électrique.

SCHÉMA DE PRINCIPE DU COUPLAGE ENTRE CHALEUR ET ÉLECTRICITÉ



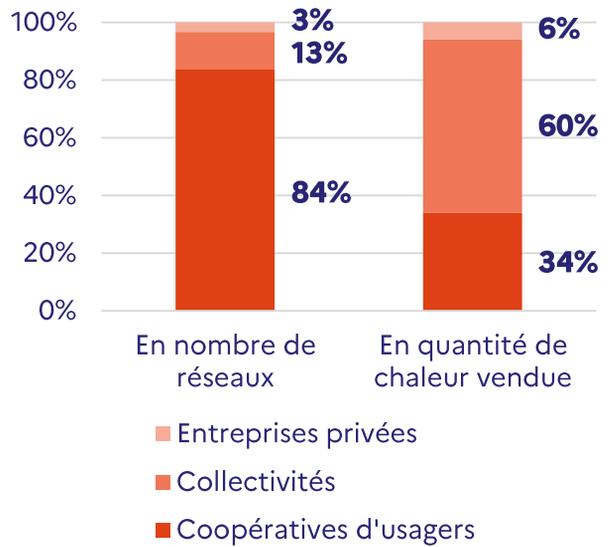
UNE GOUVERNANCE LOCALE À BUT NON-LUCRATIF

Il existe de nombreuses petites entreprises de chauffage urbain appartenant aux consommateurs. Toutefois, elles ne représentent qu'une faible proportion des ventes totales de chaleur du secteur (34%). Les municipalités représentent de loin la plus grande part des ventes de chaleur du secteur (60%), en lien notamment avec les réseaux des grandes villes détenues majoritairement par les municipalités.

EN BREF

- Une maîtrise d'ouvrage opérée par les collectivités ou les coopératives d'usagers.
- Un modèle économique à but non lucratif (logique de bénéfices limités).
- Une planification du développement des réseaux de chaleur à grande échelle.

RÉPARTITION DES RÉSEAUX SELON LA PROPRIÉTÉ



Vue de Copenhague © Image de wirestock sur Freepik

Partie II

EXEMPLES DE

RÉSEAUX DE

CHALEUR DANOIS



Copenhague	p.12
Sorø	p.14
Egedal	p.15
<i>Focus sur le solaire thermique</i>	<i>p.16</i>
Silkeborg	p.17
Havdrup	p.19
<i>Focus sur le stockage thermique</i>	<i>p.21</i>
Dronninglund	p.22
Høje Taastrup	p.24

LE RÉSEAU DE CHALEUR DE COPENHAGUE



Un réseau qui s'étend sur une surface d'environ **50** millions de m².



Un réseau de transport qui relie :

- **4** centrales de cogénération, **4** incinérateurs de déchets, plus de **50** chaufferies de pointe ;
- à **20** sociétés de distribution.



Une production de chaleur d'environ **8,3** TWh.

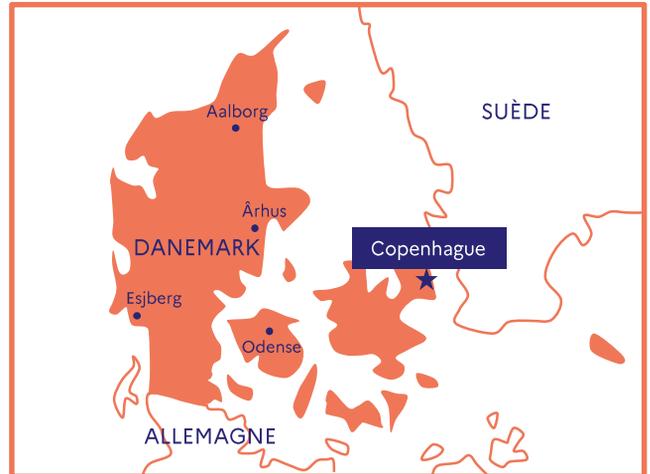


Une économie de **200 000** tonnes de pétroles chaque année soit **665 000** tonnes de CO₂.

Au début des années 1980, avec la mise en place de la planification thermique, Copenhague repense son système énergétique. Les cinq municipalités, très différentes en termes de taille, s'associent alors pour répondre à cette politique gouvernementale.

Dans la partie centrale de la zone du Grand Copenhague, des systèmes de chauffage urbain sont déjà installés. Sur l'île d'Amager, trois grandes centrales électriques sont également implantées, mais en raison des conditions géographiques spécifiques, il n'est pas possible d'étendre le champ d'activité au-delà des frontières de l'île. Il manque donc un lien permettant de relier les différents réseaux de chauffage urbain aux centrales électriques afin d'utiliser la pleine capacité des installations.

Un réseau de transport dit intercommunal ou régional est ainsi mis en place afin de relier les différentes installations existantes, c'est-à-dire les réseaux de chauffage urbain locaux et les installations de production.



“ LE SYSTÈME DE CHAUFFAGE URBAIN DE COPENHAGUE EST L'UN DES PLUS GRANDS AU MONDE. ”

La production, le transport et la distribution sont donc séparés en trois domaines d'exploitation différents :

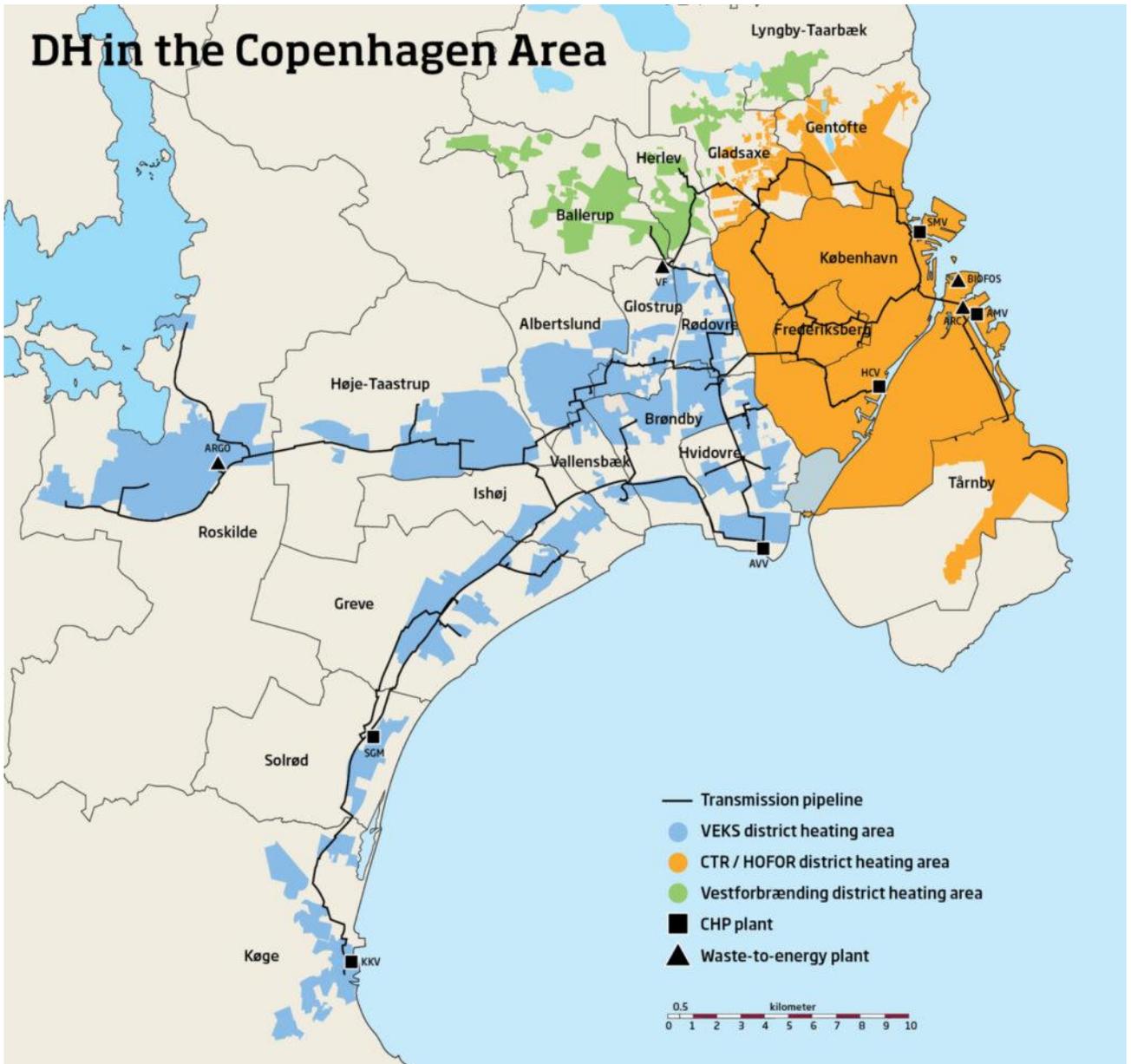
- L'entreprise de transport achète la chaleur des unités de production, la transporte à travers le réseau et la vend aux communes partenaires.
- Les communes, de leur côté, se chargent de la distribution jusqu'aux différents consommateurs.

L'un des principaux avantages de ce concept est que l'entreprise de transport peut choisir librement entre les différentes installations de production. Ce choix repose entre autres sur des critères de prix et sur le respect des directives environnementales prescrites par le gouvernement.

Par ailleurs, comme dans la plupart des zones métropolitaines, la quantité de déchets augmente malgré les meilleures intentions pour inverser la tendance. Les capacités de deux grandes usines d'incinération de déchets de la région ont donc récemment été étendues. Une part croissante de l'incinération des déchets consiste à produire de la chaleur et de l'électricité. En moyenne, l'incinération des déchets couvre un quart de la demande totale de chaleur de la région de Copenhague.

LE RÉSEAU DE TRANSPORT DU GRAND COPENHAGUE

Source : dbdh.dk



CHP plant : unité de cogénération

Waste-to-energy plant : unité de valorisation énergétique des déchets

Les 3 grands réseaux de transport du Grand Copenhague :

- En **bleu**, le réseau de transport de VEKS ;
- En **jaune**, le réseau de transport de CTR/HOFOR ;
- En **vert**, le réseau de transport de Vestforbrænding.

LE RÉSEAU DE CHALEUR DE SORØ

Le réseau de chaleur de Sorø (8 300 habitants) s'est équipé d'une centrale biomasse permettant de valoriser les déchets verts des jardins et parcs des communes en chaleur (12 MWth) et en électricité (1 MWé).

Cette centrale est installée en remplacement d'une installation alimentée au gaz visant l'atteinte d'un mix énergétique du réseau de chauffage urbain de 100% d'énergies renouvelables et de récupération.

Les déchets verts proviennent de 6 municipalités (Faxe, Sorø, Næstved, Vordingborg, Slagelse et Ringsted). Ils sont collectés puis préparés sur une plateforme situé à Næstved, à une trentaine de kilomètres de Sorø.

Le centrale biomasse conçue par Dall Energy fonctionne avec un four de gazéification permettant l'utilisation de biomasse avec des caractéristiques très hétérogènes et des taux d'humidité allant de 20 à 60%.

La technologie employée permet également une grande flexibilité de charge (de 10 à 100%), critère primordiale pour faciliter le couplage à du solaire thermique sans grande capacité de stockage comme à Silkeborg par exemple.



“ LA CENTRALE BIOMASSE EST CONÇUE POUR FONCTIONNER AVEC 100% DE DÉCHETS VERTS. ”

L'usine Sorø Bioenergi convertit environ 30 000 tonnes de déchets de jardins et de parcs en chaleur et en électricité évitant le rejet de 10 000 tonnes de CO₂ par an.

Suite à la mise en fonctionnement de la centrale biomasse, un ménage moyen peut s'attendre à une réduction annuelle de ses coûts de chauffage de près de 25%.



Combustible issu des déchets verts



Centrale biomasse produisant de la chaleur et de l'électricité à Sorø
Source : Dall Energy / dbdh.dk

LE RÉSEAU DE CHALEUR DE EGEDAL

Egedal Fjernvarme A/S est une petite entreprise municipale de chauffage urbain qui alimente la commune de Egedal (43 000 habitants). La production de la chaleur repose sur des panneaux solaires, une chaudière biomasse, deux moteurs à gaz et quatre chaudières à granulés de bois.

L'entreprise municipale, créée en 2013, décide dans les années 2020 d'étendre le chauffage urbain pour couvrir la majeure partie de la commune afin de supprimer progressivement le gaz naturel à horizon 2025.

Plusieurs extensions sont alors réalisées entraînant une multiplication par 5 des ventes de chaleur (passant de 25 à 120 GWh).

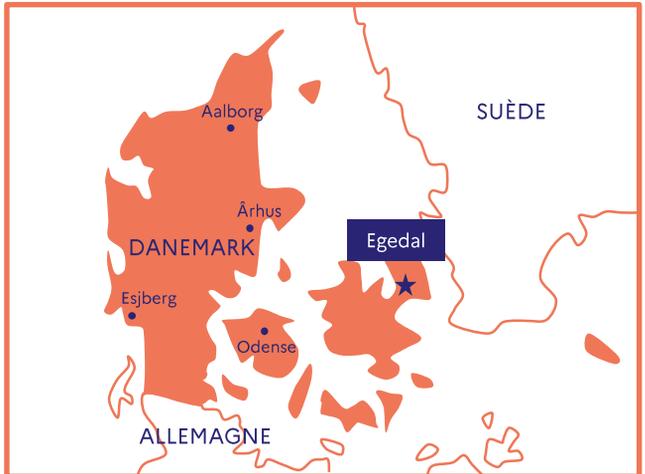
Ces phases d'extension sont associées à une campagne marketing pour inciter les particuliers à se raccorder au chauffage urbain afin de bénéficier d'une énergie verte à un coût compétitif. Pour se raccorder, les habitants peuvent choisir entre 2 modèles.

Cette campagne fonctionne, puisqu'elle a permis de convaincre jusqu'à 70 % des clients potentiels des zones aujourd'hui desservies par le gaz de se convertir au chauffage urbain. La chaleur destinée aux nouveaux clients est produite par des pompes à chaleur (PAC) air/eau, des PAC sur eaux usées et le surplus de chaleur des entreprises.

LE RÉSEAU EN QUELQUES CHIFFRES

Entre une **10^{aine}** et une **20^{aine}** de raccords par semaine.

Multiplication par **5** de la chaleur vendue en 6 ans.

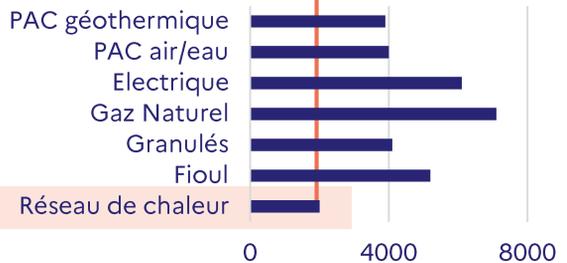


“UNE CAMPAGNE AUPRÈS DES HABITANTS”
POUR INCITER AU RACCORDEMENT.

TCO*/AN D'UNE MAISON STANDARD DE 130 M²
CONSOMMANT 18,1 MWH

Source : Egedal Fjernvarme

Le réseau de chaleur, une solution de chauffage compétitive



*total cost of ownership ou coût total de possession

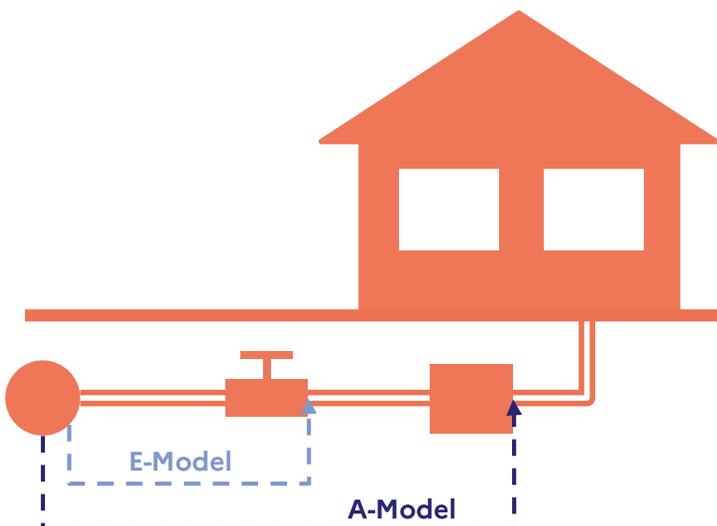
2 MODÈLES POUR SE RACCORDER

LE MODÈLE A

Egedal Fjernvarme prend en charge le raccordement de la maison, l'installation de la sous-station et l'entretien. Le propriétaire verse un loyer mensuel d'une trentaine d'euros pour la prestation. C'est le modèle choisit à 98%.

LE MODÈLE E

Egedal Fjernvarme prend en charge le raccordement de la maison. L'installation de la sous-station et l'entretien sont à la charge du propriétaire.





FOCUS SUR LE SOLAIRE THERMIQUE AU DANEMARK

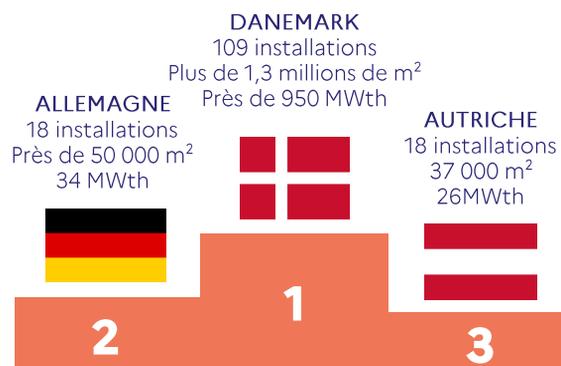
Le chauffage solaire s'est développé dès les années 1980 au Danemark passant de petites installations individuelles à une intégration à grande échelle via les réseaux de chaleur urbains, en lien avec une politique financière incitative (taxes sur le gaz, subventions aux énergies renouvelables).

Depuis 2016, les politiques ont fortement réduit ce soutien et réorienté les aides vers le secteur des pompes à chaleur, impactant négativement la forte dynamique impulsée les années précédentes.

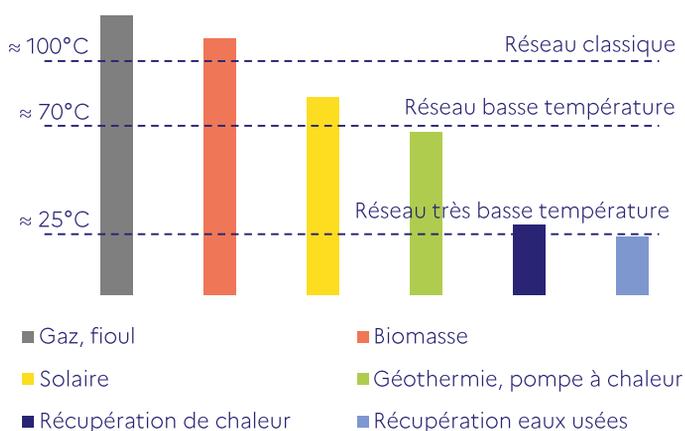
Le Danemark reste néanmoins loin devant en termes de puissance installée en solaire thermique parmi les pays européens.

La forte pénétration du solaire thermique sur les réseaux de chaleur a également été permise grâce aux régimes de températures mis en œuvre sur les réseaux danois. Grâce à un travail de fond initié depuis la fin des années 1970 sur la conception des bâtiments et des systèmes de chauffage, le Danemark a réussi à diminué le régime de température des réseaux de chaleur autour de 65 / 35°C (environ 10 à 15°C de plus sur les réseaux des grands centres urbains). Cela permet notamment de travailler avec des réseaux plus efficaces (pertes thermiques limitées), intégrant des sources d'énergies renouvelables et de récupération plus variées (notamment sur les sources à plus basse température), et compatibles avec des systèmes de stockage de grande capacité.

CLASSEMENT DES PAYS EUROPÉENS SUR LE SOLAIRE THERMIQUE (nombre d'installations, surface de capteurs en m² et puissance installée). Données issues de solar district heating.eu à fin 2017



PLAGE DE TEMPÉRATURES DES DIFFÉRENTES SOURCES DE CHALEUR



EN BREF

La forte pénétration du solaire thermique au Danemark s'explique par :

- Une politique incitative au profit des énergies renouvelables depuis les années 1980 ;
- Des caractéristiques techniques des réseaux de chaleur danois facilitant l'intégration des sources basse température.



Champ solaire du réseau de Silkeborg au Danemark

LE RÉSEAU DE CHALEUR DE SILKEBORG

Le réseau de chaleur de Silkeborg (43 000 habitants) est alimenté par la plus grande centrale solaire thermique au monde, mise en service en 2016.

LE RÉSEAU EN QUELQUES CHIFFRES



25 000 bâtiments raccordés et
600 km de réseau



Environ **370 GWh** de chaleur vendue
et **310 GWh** d'électricité



Environ **30%** d'énergie renouvelable
Couvert par la centrale solaire thermique et la
part d'électricité renouvelable utilisée.



“ LA PLUS GRANDE CENTRALE SOLAIRE
THERMIQUE AU MONDE ”

LES INSTALLATIONS

LA CHAUFFERIE

- 1 centrale à cycle combiné gaz (2 turbines de 50 MW)
1 chaudière gaz à condensation
 - 2 chaudières électriques (30 et 50 MW)
 - PACs à absorption utilisant l'énergie grise de la chaufferie
 - 1 chaudière biomasse en construction (20 MW) et une nouvelle PAC (22MW)
- Les turbines à gaz rendent l'usage de la vapeur possible. Elles font également de cette installation l'une des plus importantes consommatrices de gaz du pays.



Intérieur de la chaufferie avec l'une des chaudières électriques (en vert)



Stockage d'une capacité totale de 64 000 m³

LE STOCKAGE

4 cuves de 16 000 m³



85°C



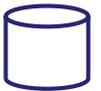
85°C



45°C



25°C



- La production de la centrale solaire est injectée dans les cuves **haute température en été (85°C)** et dans la cuve **moyenne température (45°C)** en hiver.
- Les PACs à absorption permettent le sous-refroidissement des retours du réseau afin d'optimiser la production solaire en utilisant la cuve **basse température 25°C**.

→ Le stockage est la pierre angulaire du réseau assurant la flexibilité et l'optimisation des usages et des productions énergétiques en fonction de l'évolution des prix de marché du gaz et de l'électricité.



LA CENTRALE SOLAIRE

- Puissance de 110 MWth pour près de 160 000 m² de capteurs et 22 km de tuyauterie répartie sur une surface de 50 ha.
 - Production de 80 GWh par an permettant de couvrir 20% de la fourniture en chaleur du réseau, avec une couverture de 100% de juin à août.
 - Les panneaux sont répartis en 4 champs solaires de 40 000 m² opérés de manière indépendantes et équipés chacun de son propre échangeur de chaleur et de pompes dédiées.
 - Les possibles surchauffes sont gérées par évacuation sur le stockage ou par rafraîchissement nocturne. Il n'y a pas d'aérothermes.
 - L'entretien est effectué par 300 moutons en écopâturage.
- La surface de capteurs et la puissance installée font de cette centrale solaire la plus grande installation de ce type au monde.
- Le régime de températures du réseau est de 65°C pour les températures de départ (jusqu'à 75°C en hiver) et entre 35 et 40°C pour les températures de retours. Un mécanisme de malus tarifaire permet d'inciter les usagers à renvoyer des températures retours les plus basses possibles afin d'optimiser l'intégration du solaire sur le réseau.



Local technique associé à un champ solaire
© NewHeat



Champ solaire de Silkeborg

Des évolutions sont prévues sur le réseau de Silkeborg avec notamment la construction d'une chaufferie biomasse associée à de nouvelles PAC. L'objectif est d'augmenter le taux d'énergies renouvelables et de récupération sur le réseau en passant de 30% actuellement à 60%.

La présence de stockage permet d'optimiser le fonctionnement des moyens de production variés en fonction des conditions météorologiques (pour le solaire) et des prix de l'électricité et du gaz (pour la centrale combiné, la chaudière gaz et les chaudières électriques) ; dans le but de fournir la bonne température aux usagers au meilleur tarif.



Ensemble des champs solaires du réseau de Silkeborg

LE RÉSEAU DE CHALEUR DE HAVDRUP

Afin de réduire sa dépendance au gaz naturel, le réseau de chaleur de Havdrup (4 400 habitants) situé à une trentaine de kilomètres de Copenhague, a mis en place une centrale solaire d'une puissance de 1,9 MWth. Elle permet de couvrir environ un quart des besoins en chaleur et d'éviter l'émission de 230 tonnes de CO₂ par an.



LE RÉSEAU EN QUELQUES CHIFFRES



350 foyers



Environ 28% d'énergie renouvelable couvert par la centrale solaire thermique

LES INSTALLATIONS

LA CENTRALE SOLAIRE



- Puissance de 1,9 MWth
- 2 569 m² de panneaux
- 1 226 MWh de production de chaleur par an à une température d'environ 95°C
- Couverture d'environ 28% des besoins



Stockage d'une capacité de 1 250 m³



LE STOCKAGE

- Tank d'une capacité de 1 250 m³

LES CONSOMMATEURS

Pour le raccordement au réseau de chaleur, deux options sont possibles pour l'abonné :

- **OPTION 1** : le gestionnaire ou la coopérative* fournit la chaleur jusqu'au mur de la maison, et le propriétaire s'occupe de l'installation à l'intérieur de sa maison ;
- **OPTION 2** : le gestionnaire s'occupe de tout, y compris de l'installation à l'intérieur de la maison avec location de l'échangeur autour de 30 € / mois.

90 % des particuliers souscrivent à l'OPTION 2.

La durée des contrats de raccordement est courte, d'environ 3 mois. Après ce délai de 3 mois, les particuliers peuvent, s'ils le souhaitent, se débrancher du réseau de chaleur urbain et repasser à un autre système de chauffage, à leur charge.

Le raccordement est gratuit, si le particulier se raccorde à la création ou à l'extension du réseau. Sinon, il lui coûtera environ 10 000 € s'il se raccorde a posteriori. Cette mesure incite ainsi les particuliers à se raccorder rapidement.

Par ailleurs, la réglementation danoise impose aux entreprises de réseaux de chaleur, considérées comme « service public », de ne pas faire de profit. Les gains engendrés sont directement réinvestis dans le réseau de chauffage urbain.



Sous-station équipant une maison de particulier raccordée au réseau de chaleur de Havdrup, située dans un quartier résidentiel peu dense. Elle se compose de deux échangeurs (chauffage et eau chaude sanitaire) et d'un compteur.

* Selon le modèle danois, les consommateurs d'un quartier et/ou d'un village se regroupent en association. Ainsi, le conseil d'administration de la coopérative gestionnaire du réseau de chauffage urbain se compose de trois représentants des consommateurs, d'un membre de la municipalité et de l'entreprise gestionnaire du réseau.



FOCUS SUR LE STOCKAGE

Le recours à une solution de stockage est un moyen efficace d'optimiser le dimensionnement et le fonctionnement d'un réseau de chaleur.

Plusieurs techniques de stockage existent. Le choix d'une solution dépend notamment de la capacité souhaitée (stockage journalier, hebdomadaire, inter-saisonnier) ; certaines étant plus rentables à grandes échelles. Une fois l'investissement réalisé, le stockage est peu coûteux en frais de fonctionnement.

LES INTÉRÊTS DU STOCKAGE



OPTIMISER LE FONCTIONNEMENT

Le stockage permet d'offrir de la flexibilité dans le fonctionnement du réseau en découplant la production de la consommation.



OPTIMISER LE DIMENSIONNEMENT

Le stockage permet de diminuer la puissance totale installée et donc le coût de l'investissement initiale en optimisant la valorisation de la production sur l'ensemble de l'année. Il peut ainsi limiter le recours à des moyens de production supplémentaires (pour l'appoint ou le secours).

COMPARAISON GÉNÉRALE DES COÛTS D'INVESTISSEMENT SPÉCIFIQUES BASÉS SUR L'ÉNERGIE RÉCUPÉRÉE AU COURS D'UN CYCLE DE CHARGE/DÉCHARGE (Source : IEA-SHC 1982)

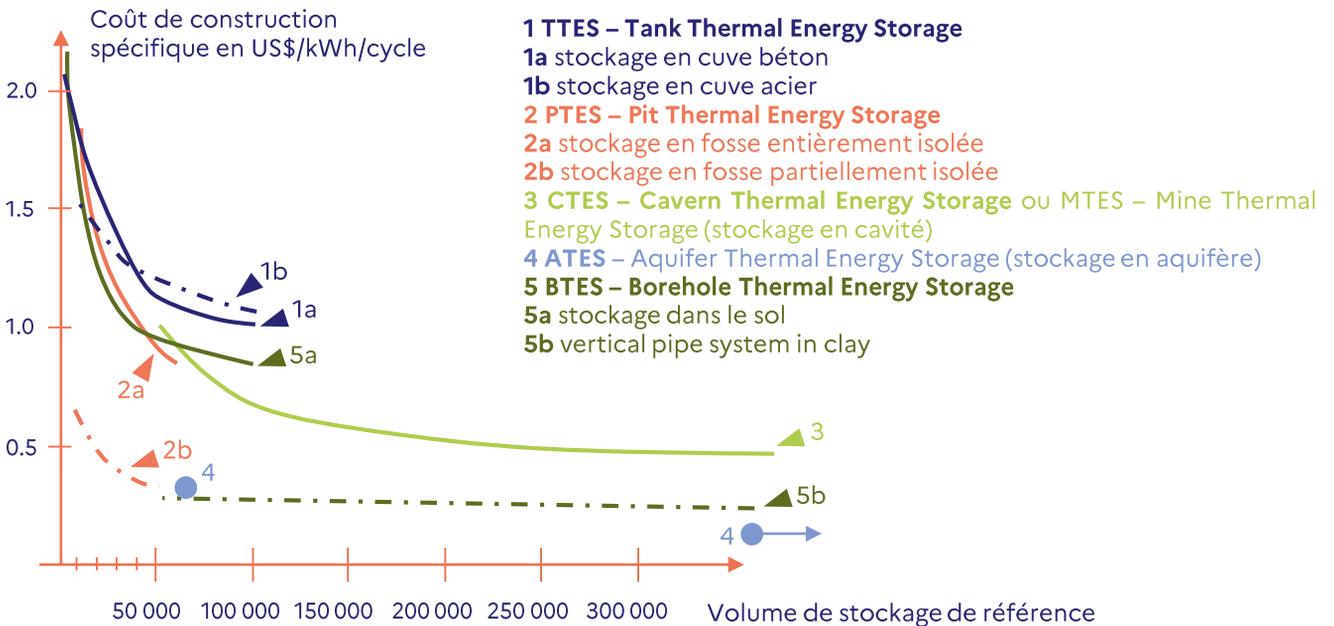


TABLEAU DE SYNTHÈSE (Source : [Stockage thermique et réseaux de chaleur – Cerema – Septembre 2021](#))

Type	Durée de stockage	T°C de stockage	Volume	Densité (kWh/m³)	Coût	
TTES	Eau (P _{atm})	Court terme	< 100°C	•	35	€€€
	Eau sous pression	Court terme	> 100°C	•	Jusqu'à 40	€€€
	Eau (P _{atm} ou sous pression)	Moyen à long terme	> 100°C	••	35 à 40	€€€€
BTES	Sol/Roche	Long terme	< 90°C	••••	5 à 15	€
ATES	Eau/Sable	Long terme	≈ 5 à 50°C	••••	15 à 20	€
PTES	Eau (P _{atm})	Long terme	< 90°C	•••	≈ 35	€€
	Eau/Gravier ou Eau/Sable	Long terme	< 90°C	•••	15 à 25	€€

LE RÉSEAU DE CHALEUR DE DRONNINGLUND

Le réseau de chaleur de Dronninglund (3 500 habitants) alimente une grande partie de la population de la ville. Il est alimenté par l'un des plus grands champs solaires au monde.

LE RÉSEAU EN QUELQUES CHIFFRES



1 350 abonnés
46 km de réseau



25 à 30 GWh de chaleur vendue par an



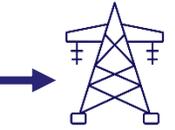
Un champ solaire de **37 573 m²** qui couvre plus de **30%** de l'approvisionnement énergétique du réseau



LES INSTALLATIONS

CHAUDIÈRE BIO-FUEL
10 MWth

COGÉNÉRATION GAZ
3,6 MWé
5 MWth



Réseau électrique

CHAUDIÈRE GAZ
7 MWth



STOCKAGE EN FOSSE
(Pit Thermal Energy Storage – PTES)
62 000 m³

STOCKAGE EN CUVE
850 m³

71 – 74°C

32 – 38°C

35°C

12°C

75°C



DRONNINGLUND
3 500 habitants

CHAUDIÈRE BIO-FUEL
5 MWth



POMPE À CHALEUR
6 MWth

32 – 38°C



CHAMPS SOLAIRE
38 000 m²
26 MWth

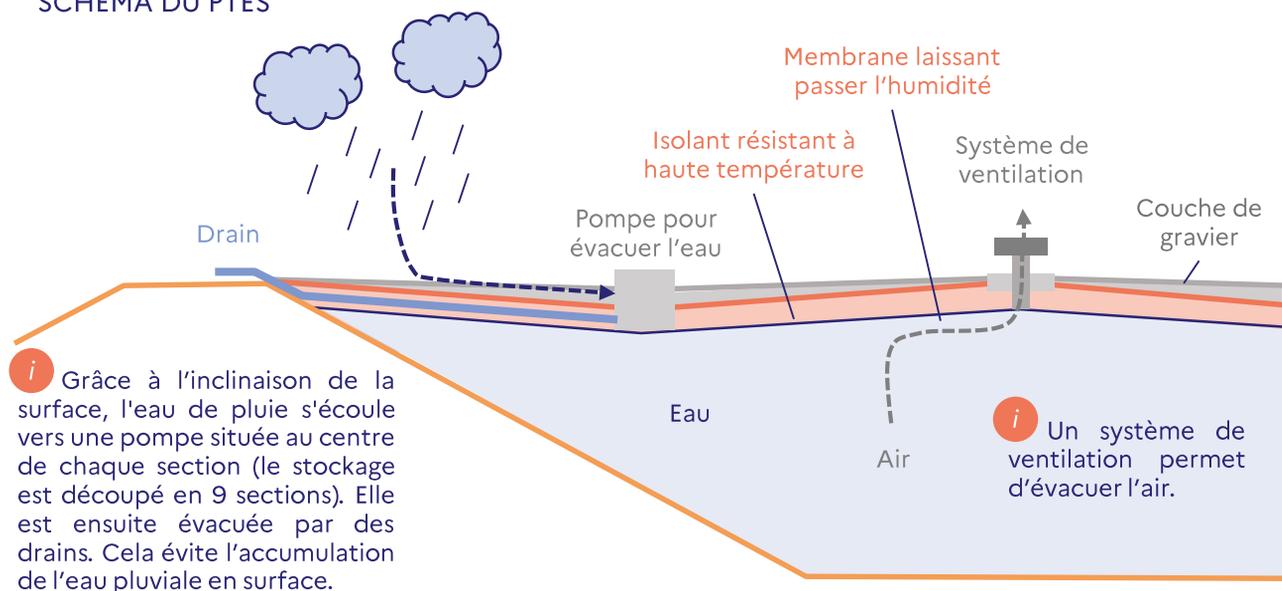
LE STOCKAGE EN FOSSE

Le réseau de Dronninglund est équipé d'un stockage en fosse (PTES Pit Thermal Energy Storage) d'une capacité de 62 000 m³. Ce stockage inter-saisonnier permet d'optimiser le rendement du champs solaire de 38 000 m². 35% de l'approvisionnement énergétique du réseau passe par le stockage en fosse (alimenté par le champ solaire et les pompes à chaleur).



Vue aérienne du stockage PTES
Lunderbjerg Nordre Ringgæ © Google Maps

SCHÉMA DU PTES



Structuration de la couverture isolante
© NewHeat

Couche de lest en gravier permettant la collecte et la gestion des eaux pluviales ainsi que l'évacuation de l'air

2 épaisseurs de membrane laissant passer l'humidité afin d'éviter l'engorgement en eau des couches inférieures

2 épaisseurs d'isolant résistant à des températures de plus de 90°C

LE STOCKAGE EN QUELQUES CHIFFRES



La température de stockage varie entre **50 et 90°C** en moyenne. Les pertes thermiques sont estimées à 10%.

Les pertes en eau sont estimées à environ **200 m³** soit environ 3% du volume.

Le stockage de Dronninglund effectue en moyenne **2 cycles de charge / décharge** par an. (*)

(*) La performance de ce type de stockage dépend du nombre de cycles de charge/décharge par an. Il peut varier de 1 comme à Marstal à plus de 10 comme à Høje Taarstrup. Plus le nombre de cycle est important, meilleure sera l'efficacité du stockage.

LE RÉSEAU DE CHALEUR DE HØJE TAASTRUP

Le réseau de chaleur de Høje Taastrup (55 000 habitants) fait partie du réseau du Grand Copenhague. Il est rattaché au réseau de transport de VEKS auquel il achète de la chaleur :

- 30% est issu de l'incinération des déchets ;
- 60% est issu de la cogénération utilisant de la biomasse.

10% provient d'un site de production locale associant du solaire thermique avec une pompe à chaleur.

Le réseau de chaleur couvre 70% des besoins en chaleur de la commune.

Un stockage en fosse (PTES) de 70 000 m³ est intégré au réseau depuis 2023.



LE RÉSEAU EN QUELQUES CHIFFRES



7 700 bâtiments raccordés



305 GWh de chaleur vendue par an

LES OBJECTIFS DE LA VILLE DANS LE CADRE DE SON PLAN CLIMAT 2030 :

- Aucun bâtiment chauffé au gaz ou au fioul à l'horizon 2030 ;
- Conversion des zones avec du gaz au réseau de chaleur (environ 2 500 bâtiments).

LE STOCKAGE

STOCKAGE EN FOSSE (PTES)



- Capacité de 70 000 m³
- Capacité de charge et décharge de 30 MW
- Capacité de stockage de 3 300 MWh
- Température moyenne de stockage de 90°C

Ce PTES est le premier stockage de ce type sur le réseau de chaleur du Grand Copenhague. Le stockage est chargé à partir du réseau de transport et déchargé vers le réseau de distribution.

Il permet d'économiser 7,5 GWh/an et 6 200 tonnes de CO₂ en optimisant la production électrique (couplage sectoriel) et en limitant la production de pointe. L'investissement total est de 10,7 millions d'euros portés par le réseau de transport VEKS et le réseau de distribution de Høje Taastrup.

Le stockage peut être déchargé plus d'une dizaine de fois par an. Le revêtement est capable de résister à des températures de 95 °C.



Surface du stockage en fin de construction



Vue aérienne du stockage © Plan Energi

CONCLUSION

Le chauffage urbain est particulièrement bien implanté au Danemark grâce à une politique de planification énergétique favorable au développement de cette technologie.

Permettant de massifier le recours aux énergies renouvelables et de récupération thermiques et de limiter la dépendance aux énergies fossiles, ils sont également un outil offrant de la flexibilité au réseau électrique grâce au développement d'infrastructures de stockage à grande échelle. En effet, le réseau électrique est fortement couplé aux réseaux de chaleur en lien avec la place importante accordée à la cogénération.

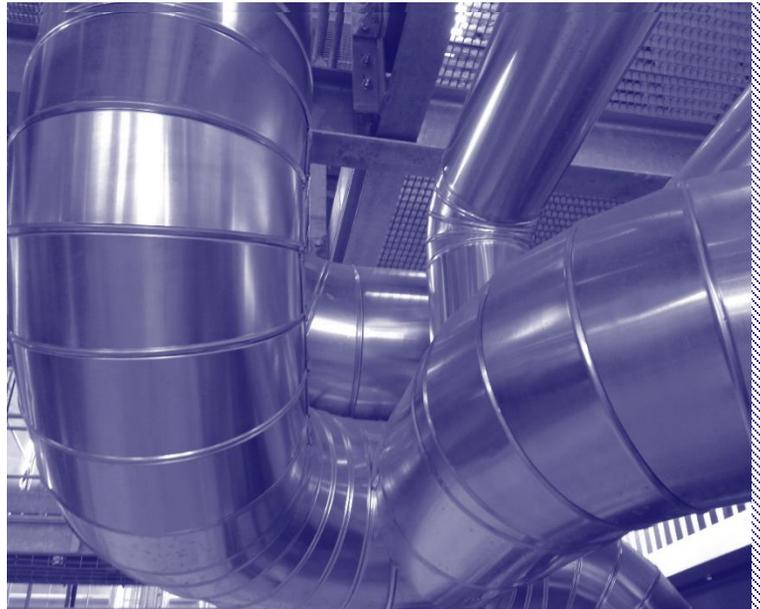
Le modèle de gouvernance locale des réseaux de chaleur, basé sur une logique de non-profit, offre une image positive à la filière. Ils sont aujourd'hui vus comme un moyen de développer la chaleur renouvelable plus rapidement et à un coût plus faible que les solutions individuelles.



Le pôle Réseaux de Chaleur et de Froid du Cerema produit et diffuse de la connaissance et de la méthodologie pour contribuer à l'atteinte des objectifs de développement de la chaleur et du froid renouvelables, fixés par l'Europe et l'État français.

Il accompagne les collectivités et leurs partenaires pour promouvoir la chaleur et le froid renouvelables et mettre en place les conditions favorables à leur déploiement dans les territoires.

<https://reseaux-chaaleur.cerema.fr/>



Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Cerema - Siège social : Cité des mobilités – 25, avenue François Mitterrand –
CS 92803 - F-69674 Bron Cedex

Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

www.cerema.fr - <https://reseaux-chaleur.cerema.fr/>