Module 3 : Production de chaleur

Module 3.4 Évaluation économique et environnementale

SHaKE – Sharing Heat and Knowledge on Energy Communities
Erasmus+ KA220-HED Cooperation Partnerships in Higher Education
Institution: Universitat Jaume I de Castellón
Auteurs: Ghad Alarnaout-Alarnaout, Dr. Adrián Mota-Babiloni
Date: Mai 2026
Version 1.1

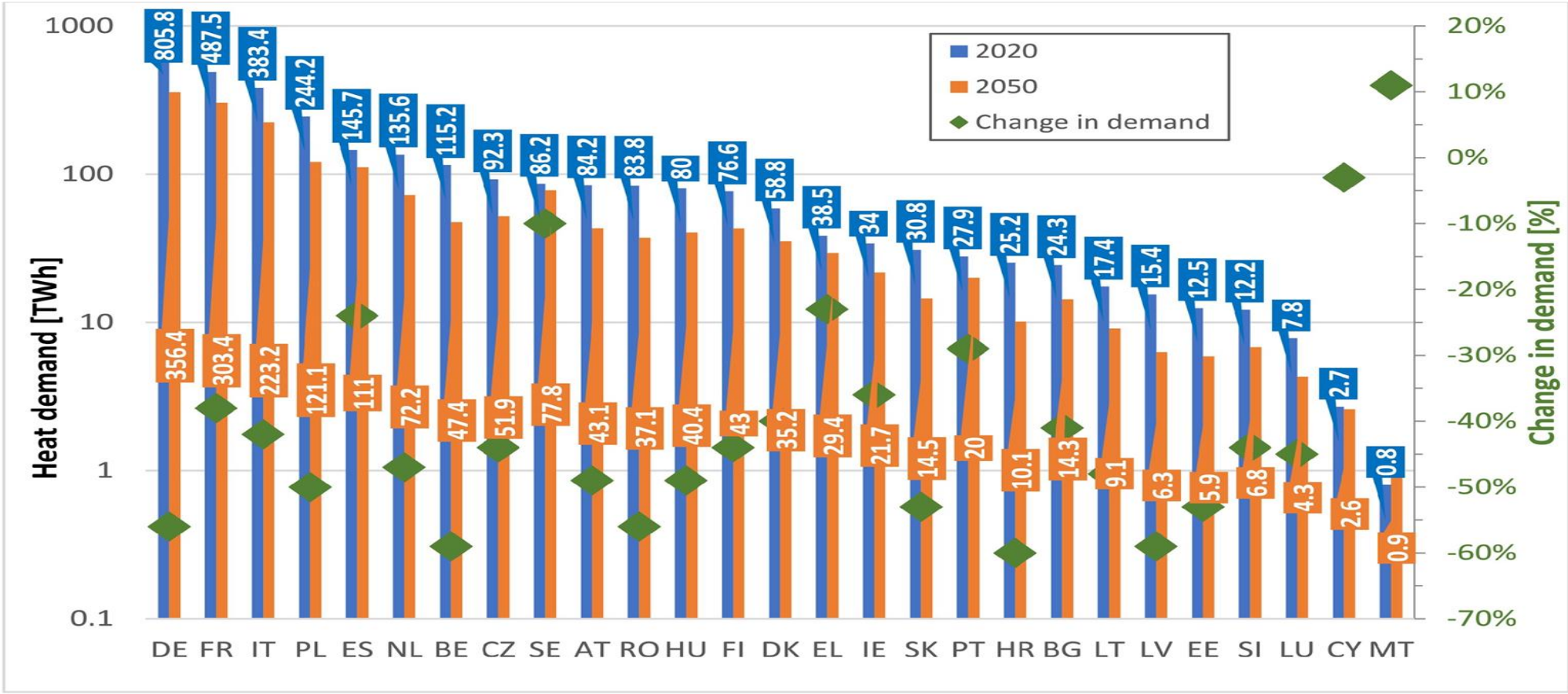
SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities



3.1. INTRODUCTION

Chauffage en Europe

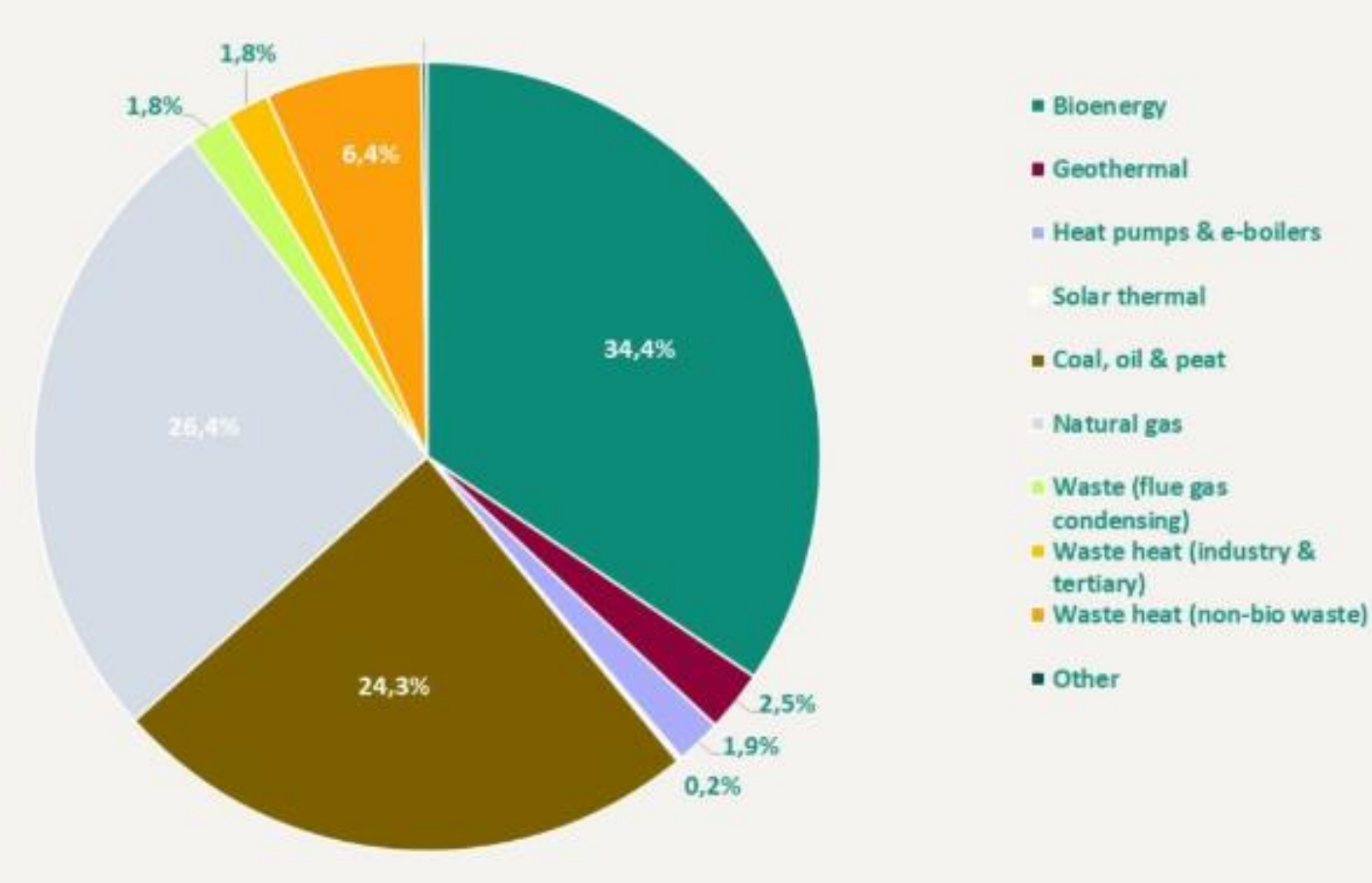
Demande de chaleur utile dans les secteurs résidentiel et tertiaire (TWh) en 2020 et 2050, ainsi que les variations relatives (axe secondaire des Y) basées sur le meilleur scénario pour l'EU 27



Fallahnejad et al. 2023. "District heating potential in the EU27: Evaluating the impacts of the heat demand reduction and market share growth". Applied energy 2023

3.1. INTRODUCTION

Sources d'énergie sur les réseaux de chaleur en Europe en 2022



Euroheat & Power. (2023). District Heating and Cooling: A key to the energy transition. https://www.euroheat.org/knowledge-hub.html

3.2. ANALYSE ÉCONOMIQUE APPROFONDIE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

Analyse économique - Introduction :

Définition :

L’analyse économique de la production de chaleur évalue la rentabilité, la viabilité financière et la durabilité à long terme des différentes technologies.

Indicateurs clés :

Dépenses d’investissement (CAPEX)
Dépenses de fonctionnement (OPEX)
Coût actualisé de la chaleur (LCOH)
Retour sur investissement (rentabilité d’un investissement en %) (ROI)
Temps de retour sur investissement

3.2. ANALYSE ÉCONOMIQUE APPROFONDIE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

Dépenses en capital (CAPEX) :

Les dépenses en capital (CAPEX) désignent les investissements réalisés par une entreprise dans des immobilisations à long terme, tels que les bâtiments, les machines et la technologie, qui sont essentiels à son fonctionnement et à sa croissance. Ces investissements peuvent être classés en deux grandes catégories :

CAPEX de maintenance : Investissements visant à entretenir ou réparer les actifs existants afin d'assurer une bonne fonctionnalité.

CAPEX d'expansion : Investissements axés sur l'acquisition de nouveaux actifs ou la modernisation de ceux existants afin d'augmenter la capacité de production ou d'entrer sur de nouveaux marchés.

Les composants typiques du CAPEX incluent :

L'équipement
Son installation
Les infrastructures nécessaires
Les coûts d'intégration système

3.2. ANALYSE ÉCONOMIQUE APPROFONDIE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

Dépenses d'exploitation (OPEX)

OPEX inclut les coûts récurrents pour l'exploitation et la maintenance efficaces d'un réseau de chaleur ou de froid. Les composants clés sont :

Énergie/Combustible : Les coûts sont une dépense importante influencée par les fluctuations des prix du combustible. Les sources renouvelables offrent des coûts à long terme plus stables.

Entretien : Couvre les inspections, réparations et interventions imprévues pour garantir la fiabilité.

Coûts de main-d'œuvre : Salaires et avantages pour le personnel opérationnel, généralement 30 à 50 % du total OPEX.

Surveillance des systèmes : Logiciels, analyses et formations pour le suivi en temps réel de la performance, améliorant l'efficacité et réduisant les coûts**.**

3.2. ANALYSE ÉCONOMIQUE APPROFONDIE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

Coût actualisé de la chaleur (LCOH)

Le **coût actualisé de la chaleur (LCOH – Levelized Cost of Heat)** est un indicateur permettant d'évaluer le **coût moyen de production de chaleur sur toute la durée de vie d'un système de chauffage**. Il prend en compte l'ensemble des dépenses, notamment **l'investissement initial, les coûts d'exploitation et de maintenance ainsi que les coûts de combustible**, rapportés à la quantité totale de chaleur produite. Cet indicateur permet ainsi de **comparer de manière cohérente différentes technologies et différents systèmes de chauffage**.

- **Définition et formule**

Le LCOH est calculé selon la formule suivante :

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + O_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{Q_t}{(1+r)^t}}$$

- Avec :
- I_t = dépenses d'investissement au cours de l'année t
- O_t = coûts d'exploitation et de maintenance au cours de l'année t
- F_t = coûts de combustible au cours de l'année t
- Q_t = quantité de chaleur produite au cours de l'année t
- r = taux d'actualisation
- n = durée de vie prévue du système

3.2. ANALYSE ÉCONOMIQUE APPROFONDIE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

ROI et période de remboursement
Dans le contexte des systèmes de chauffage et refroidissement urbains, il est essentiel d'évaluer des indicateurs d'efficacité tels que le coût par MWh de chaleur produite et le retour sur investissement (ROI) et les temps de retour sur investissement pour évaluer leur viabilité économique et leur performance.

Coût par MWh de chaleur produite :
Le coût par MWh de la chaleur produite dans les réseaux thermiques varie en fonction de facteurs tels que les sources d'énergie, l'efficacité du système et les conditions économiques régionales. Par exemple, une étude sur les réseaux de chaleur efficaces dans l'UE a souligné que le coût par MWh peut varier considérablement selon la combinaison des sources de chaleur et des technologies de génération.

Retour sur investissement (ROI) et temps de retour sur investissement :
Les dépenses d'investissement initiales, les coûts opérationnels et les sources de revenus influencent le ROI et les périodes de remboursement des réseaux de chaleur. On peut constater sur les réseaux existants des variations importantes du coût par MWh produit, ce qui peut impacter le ROI global et les temps de retour sur investissement.

3.2. ANALYSE ÉCONOMIQUE APPROFONDIE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

Études de cas et comparaison économique

Corée du Sud :

Les systèmes de chauffage urbain plus grands réduisent les coûts moyens grâce à des économies d'échelle.
La rentabilité économique s'améliore avec l'augmentation de la taille du système.

Cogénération (CHP) vs. pompes à chaleur – Performance économique :

CHP : ~70 % d'efficacité, coûts d'exploitation assez faibles, mais coûts d'investissement élevés (1 250 à 3 300 $/kW).
Pompes à chaleur : coûts opérationnels réduits, efficacité dépendante du COP et émissions CO_2 fortement dépendantes de la source d'électricité, coûts initiaux élevés.

Europe :

Les réseaux de chaleur permettent une intégration énergétique à grande échelle à faible émission de carbone.
L'expansion augmente la flexibilité, l'efficacité et la rentabilité.

Conclusion :

L'augmentation des réseaux de chaleur améliore l'efficacité et réduit les coûts, favorisant un chauffage et un refroidissement durables.



GE Vernova. (2023, October 17). South Korea's Naepo District Heating Plant starts commercial operation, powered by GE Vernova's H-Class combined cycle equipment [Press release]. https://www.gevernova.com/news/press-releases/south-koreas-naepo-district-heating-plant-starts-commercial-operation-powered-by-ge

3.2. ANALYSE ÉCONOMIQUE APPROFONDIE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE CHALEUR

Analyse comparative des coûts :

Facteurs de coût de chaque système

Cogénération :
Coûts du combustible : Le prix et la disponibilité du combustible principal (ex. le gaz naturel) influencent directement les dépenses opérationnelles.
Dépenses en capital (CAPEX) : Coûts initiaux élevés dus aux besoins en équipement, installation et infrastructures.
Coûts de maintenance : Un entretien régulier est nécessaire pour assurer des performances optimales, ce qui augmente les dépenses opérationnelles.

Pompes à chaleur :
Coûts d'électricité : Les coûts opérationnels sont influencés par les prix de l'électricité et l'efficacité du système.
Coûts d'installation : Les dépenses liées à l'équipement et à la mise en place peuvent être considérables, notamment pour les systèmes nécessitant des conduits étendus ou des installations géothermiques.
Variabilité des performances : L'efficacité peut diminuer à des températures extrêmes, ce qui peut augmenter les coûts opérationnels.

3.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU SYSTÈME DE PRODUCTION DE CHALEUR

Impact environnemental - Introduction :

Facteurs clés analysés

Une Etude d'Impact Environnemental examine généralement un ensemble de facteurs pour évaluer l'empreinte environnementale d'un projet :

Projet Échelle et Nature.

Caractéristiques du site.

Impacts environnementaux potentiels.

Effets cumulatifs.

Mesures d'atténuation.

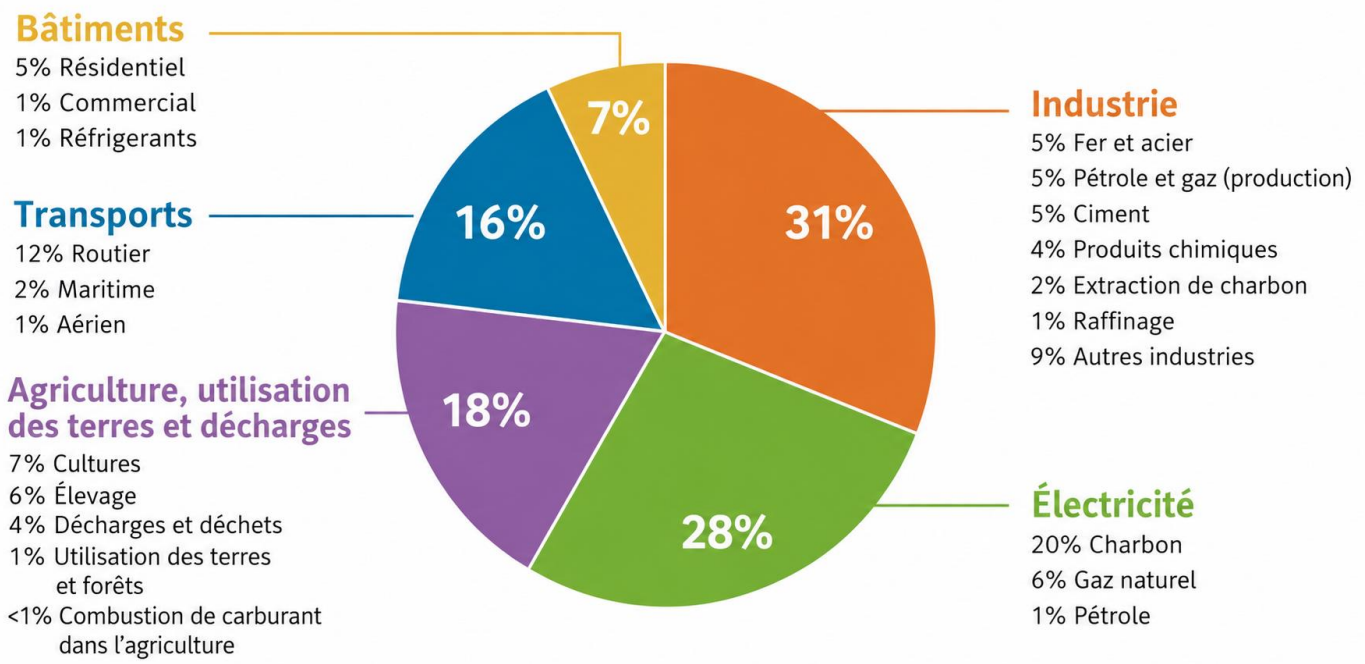
Cadre réglementaire.

3.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU SYSTÈME DE PRODUCTION DE CHALEUR

Émissions de gaz à effet de serre (GES) :

Émissions faibles/nulles avec les pompes à chaleur

Distribution des émissions de gaz à effet de serre par secteur



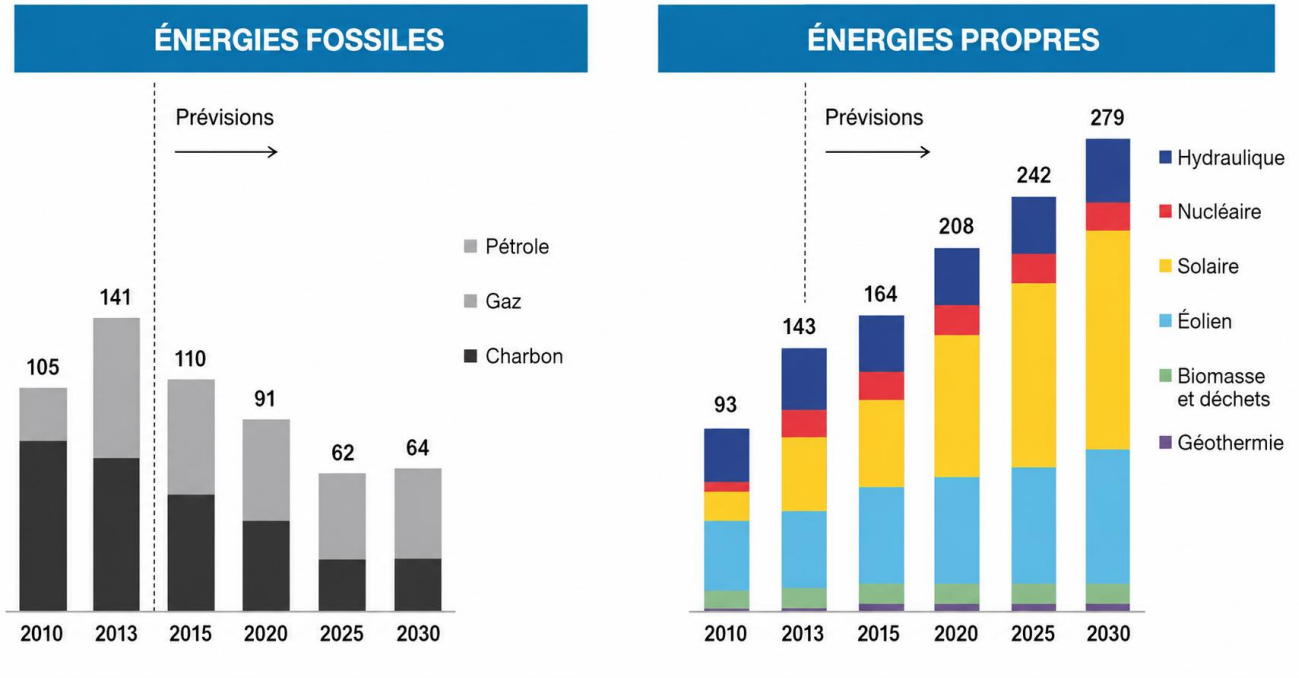
Rivera, A., Movalia, S., Pitt, H., y Larsen, K. (2022, December 19). Global greenhouse gas emissions: 1990-2020 and preliminary 2021 estimates. Rhodium Group. https://rhg.com/research/global-greenhouse-gas-emissions-2021/

3.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU SYSTÈME DE PRODUCTION DE CHALEUR

Utilisation des ressources

Efficacité et durabilité

Prévision de la capacité de production d'énergies fossiles vs énergie propre



International Energy Agency. (2024). World Energy Outlook 2024. IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

3.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU SYSTÈME DE PRODUCTION DE CHALEUR

Émissions des cogénérations vs. des pompes à chaleur

Cogénérations :

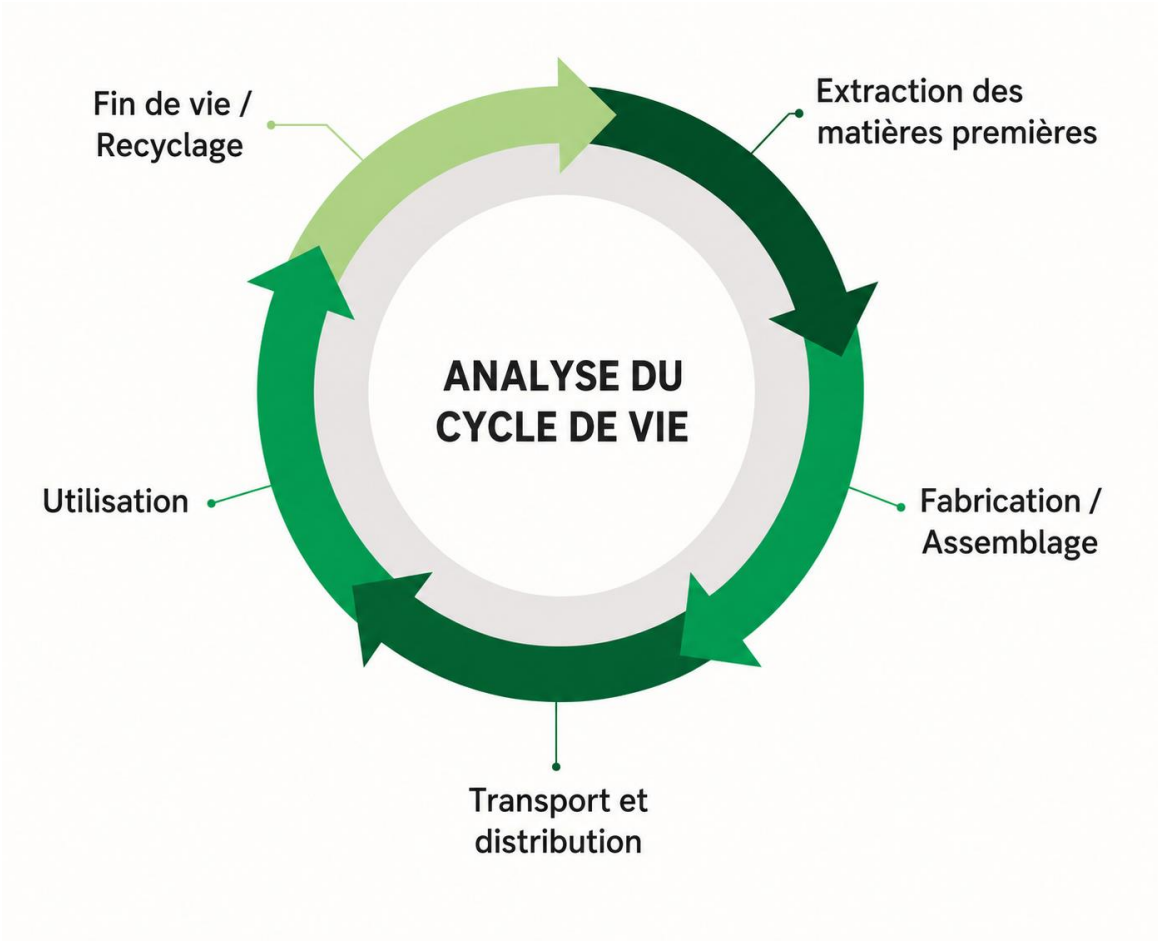
Émettent du NO_x, du SO_x et des particules.
Plus efficace que des systèmes séparés, mais qui contribue tout de même à la pollution de l'air.
Les émissions varient selon le type de combustible et la technologie.

Pompes à chaleur :

Presque aucune émission sur site (NO_x, SO_x, particules particulaires).
L'impact environnemental dépend de la source d'électricité.
Plus propres à mesure que les réseaux électriques se verdissent.

3.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU SYSTÈME DE PRODUCTION DE CHALEUR

Évaluation du cycle de vie (ACV)



European Commission. (2017). Good practice in energy efficiency: For a sustainable, safer and more competitive Europe. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2775/723141

3.4. TENDANCES DU MARCHÉ ET DE L'INDUSTRIE, PRIX ET CONCURRENCE DU SECTEUR DES CHP ET DES POMPES À CHALEUR

Tendances du marché – Introduction

Évolution de la production de chaleur et des pompes à chaleur

Évolution du chauffage :

Passage des systèmes au charbon à des technologies modernes et efficaces.
La vapeur et le chauffage électrique améliorent le contrôle et l'efficacité.
Récent passage vers des systèmes durables, en particulier les pompes à chaleur.

Pompes à chaleur :

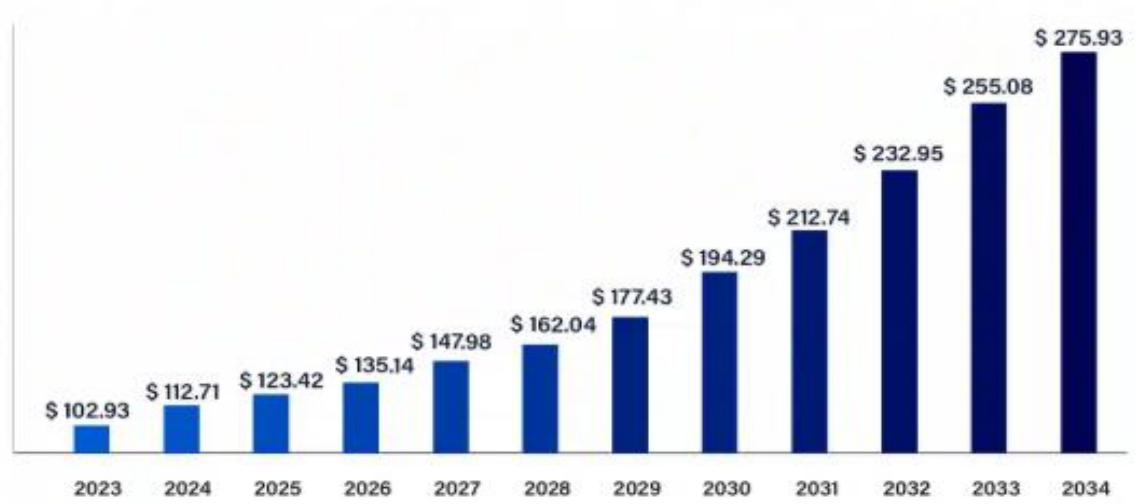
Elles représentaient ~10 % du chauffage global en 2021.
La croissance est portée par une grande efficacité et l'utilisation des énergies renouvelables.
En 2024, les ventes européennes ont chuté de 23 % en raison de facteurs politiques et économiques.
Les ventes au Royaume-Uni ont augmenté de 63 %, montrant une variation régionale dans l'adoption.

3.4. TENDANCES DU MARCHÉ ET DE L'INDUSTRIE, PRIX ET CONCURRENCE DU SECTEUR DES CHP ET DES POMPES À CHALEUR

Cogénération versus pompes à chaleur



Taille du marché de la cogénération de 2024 à 2034 (milliards USD)



Taille du marché des pompes à chaleur de 2023 à 2034 (milliards USD)

- Pompes à chaleur (PAC) : portées par l'électrification et la décarbonation, réduisent le CO_2 en remplaçant le chauffage à base de fossiles.
- Technologie PAC : amélioration des performances (par exemple, compresseurs à vitesse variable), meilleure efficacité et intégration plus facile.
- Rôle PAC : idéal avec l'électricité à faible coût/renouvelable, de plus en plus importante dans les systèmes énergétiques flexibles et bas carbone.
- Systèmes de cogénération (CHP) : privilégier une haute efficacité totale (~80 %) via la production simultanée de chaleur et d'électricité.
- Tendance CHP : transition vers l'intégration avec les énergies renouvelables et une exploitation hybride avec pompes à chaleur pour l'optimisation du système.

Precedence Research. (2024). Waste Heat Recovery System Market: Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2024-2034. *https://www.precedenceresearch.com/waste-heat-recovery-system-market*

3.4. TENDANCES DU MARCHÉ ET DE L'INDUSTRIE, PRIX ET CONCURRENCE DU SECTEUR DES CHP ET DES POMPES À CHALEUR

Leaders du secteur, dynamique des prix et impact technologique

Acteurs clés du marché

GE – Principal fournisseur de cogénération avec des systèmes fiables et performants.
Siemens Energy – leader allemand proposant des solutions cogénération pour divers secteurs.
Veolia – entreprise française fournissant des services intégrés d'énergie et de cogénération.
Wärtsilä – innovateur finlandais avec une forte présence sur le marché du cogénération.
2G Energy – spécialiste allemand de la technologie avancée de cogénération.

Tarification et dynamique du marché (2019–2022)

Augmentation des prix de l'énergie :

Électricité : +6–14 % | Gaz naturel : +22–46 %
Mazout : +35 % | Propane : +33–50 %

La hausse des prix du gaz→ une rentabilité de la CHP plus faible.
Une électricité stable/en baisse → favorise l'adoption des pompes à chaleur.
Intégration de micro-cogénération + pompes à chaleur + stockage thermique + PV → >130 % d'efficacité énergétique.
Une amélioration des performances réduit les coûts d'exploitation.
Pompes à chaleur : retour sur investissement jusqu'à 16 ans, soutenant la croissance du marché à long terme.

3.5. INSTRUMENTS POLITIQUES ET CADRES RÉGLEMENTAIRES DES CHP ET DES POMPES À CHALEUR

Instruments politiques et cadre mondial

Contexte global

Les politiques visent à limiter le réchauffement climatique à 1,5°C par la décarbonation thermique.
La mise en œuvre varie selon les régions, selon les conditions économiques et politiques.

Initiatives de l'UE

Plan REPowerEU :
20 millions de pompes à chaleur d'ici 2026
60 millions d'ici 2030 → réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

Défis du Sud global

Les coûts d'emprunt élevés ralentissent les projets d'énergie propre.
COP29 & G20 : mettre l'accent sur le financement climatique (taxes carbone, swaps de dettes).
Les politiques doivent être spécifiques à chaque région pour garantir une adoption durable.

Cadres réglementaires (UE)

RED II : ≥ 32 % d'énergie renouvelable d'ici 2030.
EED : +32,5 % d'efficacité énergétique d'ici 2030.
Normes nationales : Adapter localement les objectifs de l'UE (par exemple, l'EnEV allemand pour les bâtiments).

3.5. INSTRUMENTS POLITIQUES ET CADRES RÉGLEMENTAIRES DES CHP ET DES POMPES À CHALEUR

Subventions, tarification du carbone et impact sur le marché

Subventions et incitations
Subventions : Réduire les coûts d'investissement initiaux.
Crédits d'impôt : Encourager l'installation et l'exploitation des énergies renouvelables.
Tarifs d'achat garanti : Garantie de revenus pour les producteurs de produits renouvelables.

Impact sur le marché

Des taux d'adoption plus élevés et une expansion du marché grâce à des coûts plus faibles.
Encourager l'innovation et la compétitivité à long terme.
Réduction progressive de la dépendance aux subventions à mesure que les technologies mûrissent.

Mécanismes de tarification du carbone

Systèmes d'échange de quotas d'émission (ETS) : Les entreprises échangent des quotas d'émission ; les plafonds favorisent les réductions.
Exemple : EU ETS – le plus grand marché mondial du carbone.
Taxes carbone : Augmenter le coût des combustibles fossiles → réduire les émissions.
Exemple : la taxe carbone suédoise → d'importantes réductions d'émissions.
Ces deux instruments influencent les coûts opérationnels et favorisent une innovation plus propre.

3.6. CONSIDÉRATIONS FUTURES

Transitions énergétiques futures : décarbonation et innovation

Défis de la décarbonation

Transition vers des sources de chaleur renouvelable (solaire, géothermie, chaleur résiduelle).
Obstacles : infrastructures, investissement et capacité de stockage.
Exemple : Les systèmes géothermiques nécessitent un contrôle avancé de la température.

Innovation et technologie

Des pompes à chaleur avancées, un stockage thermique et des systèmes bas carbone favorisent une croissance durable.
Exemple : Les pompes à chaleur de nouvelle génération améliorent leur intégration avec les énergies renouvelables.

Modèles économiques et financement

Les partenariats public-privé (PPP) et les obligations vertes financent les transitions renouvelables.
Objectif : réduire les risques financiers et promouvoir un investissement durable dans le chauffage urbain.

Objectifs Net-Zero 2050

L'UE s'engage à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.
Nécessite : une intégration à grande échelle des énergies renouvelables, le stockage d'énergie et les réseaux intelligents.
Exemple : le Pacte vert de l'UE → des émissions de –55 % d'ici 2030, et zéro émission carbone d'ici 2050.

3.6. CONSIDÉRATIONS FUTURES

Transition des CHP à base de fossiles

Actuelle : les centrales thermiques utilisent le gaz naturel, le charbon, le pétrole → principales sources de CO_2.
Avenir : transition vers la biomasse, le solaire, la chaleur, la géothermie, l'hydrogène vert.
Exemple : le système danois de chauffage urbain passe à la biomasse et à la chaleur résiduelle (neutre en carbone d'ici 2030).

Avancées technologiques

Pompes à chaleur ultra-haute température (UHTHP) : fonctionnent à >100°C pour un usage industriel ou urbain.
Exemple : Energiepark Mayence (Allemagne) – > 100 % d'efficacité.
Développement avancé de la cogénération avec biocarburants et hydrogène : fonctionnement à faible émission de carbone ou zéro émission.
Exemple : centrale de CHP de Hanovre utilisant du carburant hydrogène pour la chaleur carbone neutre.

Intégration et flexibilité du réseau

Gestion du côté de la demande : les consommateurs ajustent leur consommation selon le prix/l'offre.
Stockage thermique : équilibre la demande de chaleur et les fluctuations du réseau.
Avantages : réduction des coûts, prévention de la congestion, amélioration de l'efficacité du système.

3.6. CONSIDÉRATIONS FUTURES

Résilience climatique

La variabilité du temps influence la demande de chauffage (hivers doux vs. extrêmes froids).
Solutions : opérations flexibles, stockage thermique, secours renouvelable (biocarburants, H_2).
Objectif : systèmes de chauffage urbain fiables et adaptatifs.

Résilience économique

Diversifier les sources d'énergie, appliquer des tarifs flexibles et des réseaux intelligents pour la stabilité.
Investissement à long terme et l'optimisation des coûts du cycle de vie, alignée sur les objectifs de décarbonation.

Réseaux de chaleur à l'épreuve de l'avenir : projets clés

Royaume-Uni – Green Gas for London : Biogaz + chaleur résiduelle pour le chauffage urbain zéro carbone.
Copenhill (Copenhague) : centrale de valorisation des déchets qui chauffe 150 000 foyers ; objectif neutre en carbone d'ici 2025.
Amsterdam Smart Heat Network : Intègre le stockage solaire, géothermique et thermique avec un contrôle numérique.

Impact

Décarbonation : Combiner énergies renouvelables et innovation pour des systèmes bas carbone.
Résilience et flexibilité : Approvisionnement stable sous un climat changeant.
Evolutivité su système : Conçu pour l'expansion et l'intégration technologique future.

3.7. CONCLUSIONS

Conclusions

Aspects économiques et environnementaux :

Économique : Les systèmes de chauffage urbain réduisent la dépendance aux combustibles fossiles, diminuent les coûts d'exploitation et génèrent des revenus grâce à des incitations et des crédits carbone.

Environnement : L'adoption des technologies renouvelables et la récupération de la chaleur fatale aide à décarboner le chauffage et à réduire l'empreinte carbone.

Efficacité : Les réseaux intelligents et les technologies avancées améliorent l'adaptabilité du système et l'efficacité énergétique.

Importance des politiques et tendances futures :

Politiques : Des politiques favorables telles que les subventions, la tarification du carbone et les normes énergétiques sont essentielles pour accélérer l'adoption.

Tendances futures : les pompes à chaleur ultra-haute température, la cogénération avec biocarburants et hydrogène, ainsi que les réseaux intelligents façonneront l'avenir du chauffage urbain.

Résilience climatique : La flexibilité dans la conception des systèmes garantit la fiabilité dans les conditions climatiques changeantes.

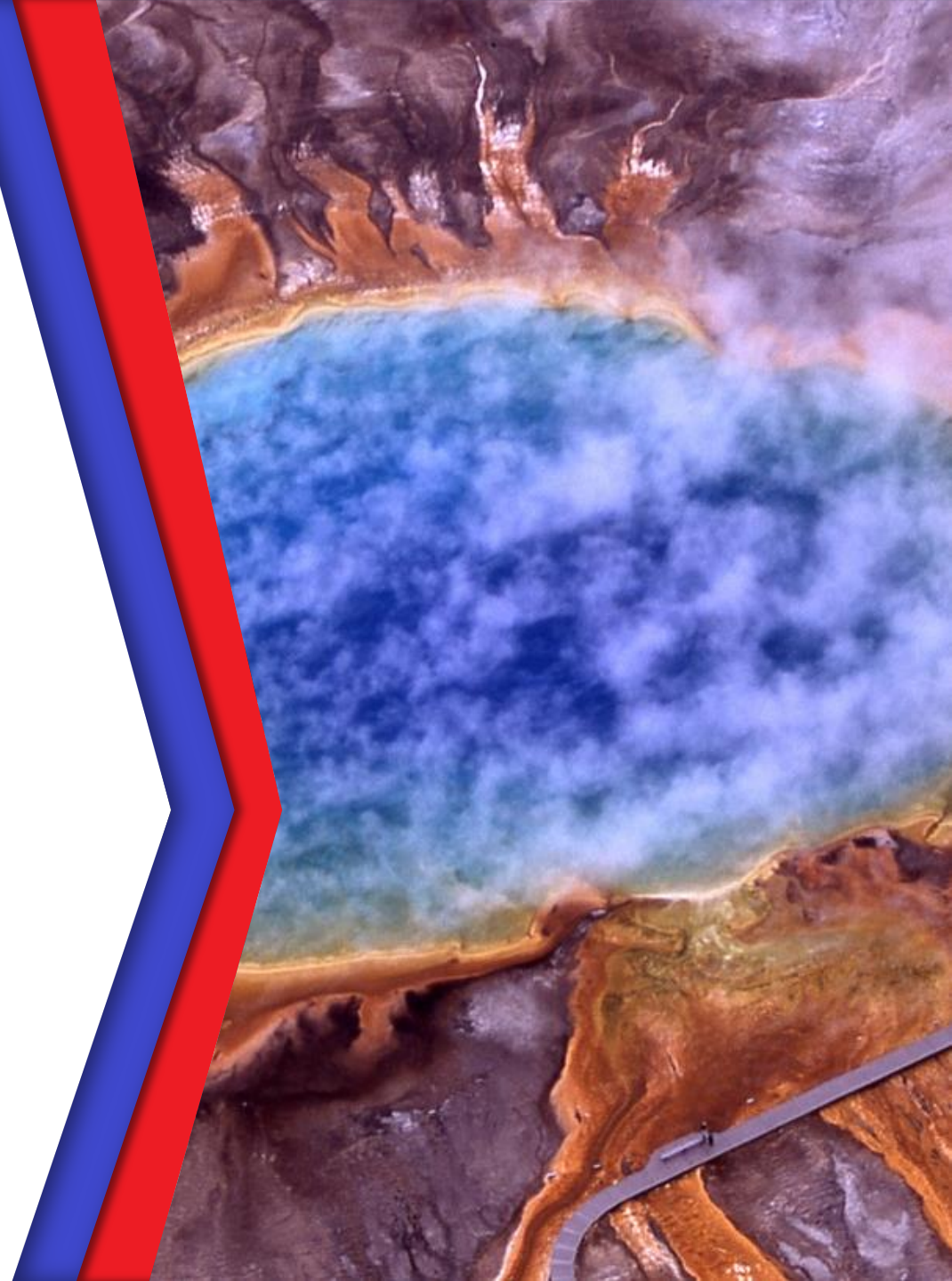
Merci!

Module 3.4 – Évaluation économique et environnementale
SHaKE – Sharing Heat and Knowledge on Energy Communities

https://www.shakeproject-dhc.eu/

Développé par Universitat Jaume I de Castellón

Dr. Adrián Mota-Babiloni | mota@uji.es
Ghad Alarnaot-Alarnaout | alarnaot@uji.es



Co-funded by
the European Union