

Performance énergétique 2.0

# Concevoir le futur système énergétique



# Il est temps de repenser la performance énergétique

Préface de Jürgen Fischer

Président, Danfoss Climate Solutions

Notre réseau électrique – l’infrastructure qui fournit notre électricité – est une chose à laquelle la plupart d’entre nous n’accordent que peu d’importance. C’est vraiment paradoxal puisque l’électricité est devenue si essentielle dans notre vie moderne. Tout, des usines aux hôpitaux, en passant par les ports, la police, l’armée et les transports, sans parler des systèmes de communication, dépend d’un réseau électrique fonctionnel. En cas de pannes d’électricité, la perte de lumière est en effet le moindre de nos problèmes. Et bien que ces pannes soient devenues plus fréquentes et plus longues, ce n’est rien comparé aux défis auxquels nous sommes confrontés dans un futur système énergétique, où la demande en énergie électrique augmentera considérablement. À moins que nous ne commençons immédiatement à repenser la performance énergétique et à la placer au cœur de la politique énergétique et des stratégies d’atténuation du changement climatique, les pannes de courant ne sont qu’un des défis importants auxquels nous sommes confrontés.

D’ici 2050, les énergies renouvelables devront représenter environ 70% du mix énergétique si nous voulons atteindre la neutralité carbone et les objectifs de l’Accord de Paris.<sup>1</sup> Malgré cela, l’attention portée à ce que cela implique pour le système énergétique est insuffisante. Aurons-nous la capacité et l’infrastructure nécessaires pour utiliser efficacement toute

cette énergie renouvelable une fois que nous l’aurons ? Quelles mesures devons-nous prendre aujourd’hui pour faire en sorte que ce futur système énergétique décarboné devienne une réalité ?

Commençons par le vent et le soleil, les chouchous du débat sur les énergies renouvelables. L’énergie produite par ces sources se présente principalement sous forme d’électricité. Mais si nous n’avons pas l’infrastructure en place pour utiliser efficacement cette électricité – dans les transports, les bâtiments, l’industrie – en produire autant est une entreprise relativement inutile. Pour utiliser l’électricité produite par les énergies renouvelables, **nous devons mener une révolution de l’ingénierie pour électrifier tous les éléments possibles de notre système énergétique.**

Une société électrifiée pourrait réduire jusqu’à 40 % la consommation d’énergie finale simplement parce que les technologies électriques perdent moins d’énergie que leurs homologues à combustibles fossiles.<sup>2</sup> Dans le même temps, les mesures de performance énergétique peuvent accélérer l’électrification des secteurs – par exemple, rendre les véhicules lourds plus efficaces est fondamental pour réduire la taille des batteries nécessaires à leur électrification. C’est pourquoi nous devons commencer à penser à l’électrification elle-même comme une forme de performance énergétique.

Le timing est primordial. Dans le futur système énergétique, il ne suffira pas d’utiliser le bon type d’énergie, nous devons également l’utiliser au bon moment. Nos habitudes et nos comportements dictent actuellement quand l’énergie est nécessaire. Lorsque nous sommes éveillés, nous consommons beaucoup, et lorsque nous dormons, nous consommons peu. De même, la nature dicte quand le soleil brille et que le vent souffle. Pour cette raison, nos besoins en énergie ne seront pas toujours alignés sur les plans météorologiques de la nature, ce qui nous oblige à utiliser des centrales électriques fossiles comme sources d’énergie résiduelles lorsque l’approvisionnement renouvelable est faible. Cela conduit non seulement à une électricité plus chère, mais aussi à une empreinte carbone beaucoup plus lourde aux heures pleines. Heureusement, **la performance énergétique sous la forme de solutions de flexibilité du côté de la demande peut mieux médiatiser la relation entre l’offre et la demande, ce qui est nécessaire pour éviter les pics de demande à forte intensité de carbone.** Grâce aux technologies existantes de flexibilité du côté de la demande, nous pouvons économiser de l’argent, réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et stabiliser le réseau.

Même dans le futur, tout ne fonctionnera pas directement à l’électricité. Nous aurons toujours besoin d’alternatives propres pour décarboner en profondeur des secteurs tels que l’industrie lourde, l’aviation et le transport maritime longue distance. Ici, l’hydrogène est l’alternative la plus prometteuse. L’hydrogène sera crucial dans le futur système énergétique qui connaîtra inévitablement des périodes d’électricité renouvelable excédentaire. Cependant, l’électrolyse de l’eau – le processus de production d’hydrogène à partir d’électricité – créera une énorme demande en électricité, ce qui exercera une pression considérable sur notre réseau énergétique déjà obsolète. Mais ensemble, **la performance énergétique et l’électrification peuvent maintenir la demande**

**en hydrogène à un niveau réaliste et atteignable tout en produisant de l’hydrogène de la manière la écoénergétique possible.** Il est urgent d’accorder une attention politique à la production d’hydrogène écoénergétique si nous voulons que l’équation énergétique future s’additionne.

La production d’énergie renouvelable sera loin d’être suffisante pour répondre à la demande en énergie d’un système énergétique électrifié desservant une population de 9,8 milliards d’habitants en 2050. Pour compléter la demande, la chaleur excédentaire sera notre meilleur allié. En 2030, jusqu’à 53 % de l’apport énergétique mondial sera perdu sous forme de chaleur excédentaire.<sup>3</sup> Mais **en la capturant et en la réutilisant, la chaleur excédentaire peut remplacer des quantités importantes d’électricité, de gaz ou d’autres combustibles qui sont autrement nécessaires pour produire de la chaleur.** Elle peut contribuer à stabiliser le futur réseau électrique et à faciliter la transition écologique.

Comme l’indiquent les thèmes ci-dessus, la performance énergétique n’est pas une réflexion après coup par rapport aux énergies renouvelables. Dans le futur système énergétique, **la performance énergétique doit occuper une place centrale et travailler en harmonie avec le développement des énergies renouvelables** pour atteindre nos objectifs climatiques, assurer la sécurité énergétique, stimuler l’économie et transformer fondamentalement la façon dont l’énergie est gérée et consommée. Cette nouvelle compréhension de la performance énergétique – ce que nous appelons « la performance énergétique 2.0 » – est le moyen le plus rapide et le plus rentable de concrétiser un scénario de neutralité carbone d’ici 2050. La bonne nouvelle, c’est que nous disposons déjà de la technologie nécessaire. Nous n’avons pas besoin de magie, mais d’une action politique immédiate pour mettre les solutions à l’échelle.

**« Utiliser le mot “black-out” pour désigner une panne de courant est quelque peu erroné. Nous retrouver sans lumière est le moindre de nos problèmes lorsque nos systèmes électriques tombent en panne. »**

Gretchen Bakke, The Grid<sup>4</sup>

« **Toute technologie suffisamment avancée est indiscernable de la magie.** »

Arthur C. Clarke,  
Hazards of Prophecy<sup>5</sup>

# Vous n'avez que 2 minutes ?

Voici la performance énergétique 2.0



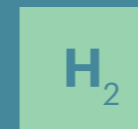
## 1. Passer à l'électrique dès que possible

En passant d'un système d'énergie fossile à un système entièrement électrifié, nous pouvons réduire jusqu'à 40 % la consommation d'énergie finale.<sup>6</sup> L'électrification est elle-même une forme de performance énergétique, car la plupart des technologies électriques ont un taux de perte d'énergie plus faible tout en remplissant la même fonction qu'un équivalent à énergie fossile.



## 2. Mettre en œuvre des solutions de flexibilité

Réinventer la performance énergétique, ce n'est pas seulement utiliser moins d'énergie, c'est aussi utiliser l'énergie au bon moment. En maximisant le potentiel de flexibilité du côté de la demande, l'UE et le Royaume-Uni peuvent économiser chaque année 40 millions de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> et réduire la production d'électricité à partir du gaz naturel de 106 TWh, soit environ un cinquième de la consommation de gaz naturel de l'UE pour la production d'électricité en 2022. À cela s'ajoutent les économies annuelles de coûts sociétaux de 10,5 milliards d'euros d'ici 2030. De même, les ménages peuvent économiser en moyenne 7 % sur leurs factures d'électricité.



## 3. Utiliser l'hydrogène à bon escient

L'alimentation de notre futur système énergétique avec des énergies renouvelables nécessitera une mise à l'échelle rapide de l'hydrogène. Cependant, la conversion de l'hydrogène nécessite des quantités incroyables d'énergie. D'ici 2050, la production d'hydrogène nécessitera plus de la moitié de la demande totale d'électricité actuelle<sup>7, 8, 9, 10</sup>. Les technologies d'électrolyse à haut rendement seront essentielles pour assurer la sécurité et la stabilité énergétiques ainsi que pour réduire la demande en énergie en faveur de l'hydrogène.



## 4. Intégrer les secteurs

En intégrant stratégiquement les secteurs et en déployant la chaleur excédentaire, nous pouvons en fin de compte réduire la demande de production d'énergie et maximiser sa performance. D'ici 2030, jusqu'à 53 % de l'apport énergétique mondial sera perdu sous forme de chaleur excédentaire.<sup>11</sup> Cependant, cette chaleur peut être captée et réutilisée pour alimenter les machines, ainsi que pour chauffer les bâtiments et l'eau grâce à une intégration sectorielle plus profonde.

# Performance énergétique 2.0

## Concevoir le futur système énergétique

Dans un scénario de neutralité carbone, ce ne sont pas seulement les sources d'énergie qui doivent changer, il en va de même pour la façon dont l'énergie est déployée, convertie, stockée, utilisée et réutilisée.

Cet article constitue un nouveau récit autour de la performance énergétique, montrant comment **l'électrification, la flexibilité du côté de la demande, la conversion, le stockage et l'intégration sectorielle** doivent occuper une place centrale dans un futur système énergétique permettant un réseau énergétique alimenté par des énergies renouvelables.

---

**7** La grande transformation du réseau

---

**11** L'avenir est électrique

---

**19** Flexibilité : le timing est primordial

---

**25** La conversion est la clé de la neutralité carbone

---

**31** Stockage pour l'énergie du futur

---

**35** Réutilisation de l'énergie grâce à l'intégration sectorielle

---

**41** Recommandations politiques

---

S'appuyant sur des preuves empiriques et des données provenant de diverses sources crédibles, Danfoss Impact numéro 4 montre comment une autre compréhension de la performance énergétique, appelée « performance énergétique 2.0 » (EE 2.0) dans l'article, sera essentielle à un système énergétique entièrement électrifié et décarboné.

Dans la littérature, le terme « réseau intelligent » est largement utilisé pour décrire le système énergétique interconnecté du futur. Dans le réseau intelligent, l'électrification, l'intégration sectorielle, la flexibilité, la conversion et le stockage se complèteront dans un système plus efficace qui fournit la bonne énergie au bon moment. C'est ce que nous appelons dans ce numéro « le futur système énergétique ».

La production future d'hydrogène doit s'appuyer sur l'électricité pour être décarbonable. Dans ce numéro, l'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable est appelé « hydrogène à faibles émissions », conformément aux World Energy Outlook de l'AIE. Ce terme est interchangeable avec le terme « hydrogène vert », qui est largement utilisé dans la littérature, mais sans définition standard.

*Un merci spécial au professeur Nick Eyre (professeur de politique énergétique et climatique à l'Université d'Oxford et chercheur principal en énergie à l'Institut du changement environnemental), au Dr Jan Rosenow (directeur des programmes européens au Regulatory Assistance Project, associé de recherche honoraire à l'Institut du changement environnemental de l'Université d'Oxford), à Frederik Dahl Nielsen (doctorant, planification de l'énergie durable à l'Université d'Aalborg), et au Dr Brian Vad Mathiesen (professeur de planification de l'énergie durable à l'Université d'Aalborg) pour avoir apporté une contribution et des commentaires précieux sur les ébauches préliminaires de ce document.*

Les opinions exprimées dans le présent document sont celles de Danfoss. Leur exhaustivité et leur exactitude ne doivent pas être attribuées à des examinateurs ou à des entités externes.

Danfoss Impact numéro 4 a été préparé par la section Analyse du groupe dans le département Communication du groupe et affaires publiques de Danfoss avec l'aide indispensable de Helge Vandel Jensen, directeur du développement commercial et de l'électrification, de Ditte Lykke Wehner, gestionnaire de portefeuille, services numériques, et d'Andrea Voigt, responsable des affaires publiques et de la communication mondiales chez Danfoss Climate Solutions.

Les commentaires ou questions peuvent être adressés à Sara Vad Sørensen, Responsable des données analytiques, à l'adresse suivante : [sara.sorensen@danfoss.com](mailto:sara.sorensen@danfoss.com).

# La grande transformation du réseau

« Nous assistons au début de la fin de l'ère des combustibles fossiles et nous devons nous préparer pour la prochaine ère. »

Fatih Birol, Directeur exécutif, Agence internationale de l'énergie<sup>12</sup>

Dans un futur système énergétique avec zéro émission nette, l'approvisionnement énergétique mondial doit diminuer de 15 % entre 2021 et 2050, parallèlement à une expansion rapide des énergies renouvelables (figure 1).

En 2021, 79 % de l'énergie mondiale était produite à partir de combustibles fossiles. D'ici 2050, ce pourcentage doit être réduit à au moins 18 % – et de préférence plus – dont 8 % doivent être réduits grâce au captage et au stockage du carbone. Bien qu'il existe encore un débat sur le potentiel du captage et du stockage du carbone, le consensus scientifique est que nous devons réduire considérablement notre dépendance aux combustibles fossiles. Dans le même temps, les énergies renouvelables représentaient 11 % de l'offre en 2021, un chiffre qui doit passer à 70 % d'ici 2050, l'énergie solaire et éolienne représentant 39 % combinées. Il n'est peut-être pas surprenant que nous ayons besoin de plus d'action que les politiques actuelles et même que les engagements annoncés pour atteindre la neutralité carbone en 2050. En d'autres termes, **rien de moins qu'une révolution à grande échelle de notre approvisionnement énergétique ne doit être entreprise pour atteindre un système énergétique compatible avec les objectifs de neutralité carbone.**

Du point de vue de l'approvisionnement énergétique pur, nous aurons besoin d'investissements substantiels dans l'énergie solaire, éolienne et d'autres énergies renouvelables, bien au-delà de ce qui est actuellement déclaré ou même promis.

Et bien sûr, cela doit s'accompagner d'une réduction simultanée des énergies fossiles.<sup>13</sup> Heureusement, **le coût des énergies renouvelables a fortement baissé ces dernières années, l'énergie solaire et éolienne terrestre connaissant les plus grands progrès.**<sup>14</sup> Dans le même temps, le prix du charbon a stagné tandis que les prix de l'énergie nucléaire ont considérablement augmenté, un bond largement associé à l'augmentation des réglementations en matière de sécurité. En termes simples, il est économiquement avantageux d'investir dans les énergies renouvelables plutôt que dans les sources d'énergie fossiles. Et elles ne feront que devenir plus attrayantes à mesure que des technologies telles que les convertisseurs d'énergie éolienne et les onduleurs solaires augmenteront l'efficacité avec laquelle ces sources d'énergie renouvelables peuvent produire de l'électricité propre. Cela signifie que nous pouvons fournir au monde une énergie à faibles émissions, qui est également l'option la moins chère et la plus efficace. Cependant, **la transition vers les énergies renouvelables s'accompagne de la nécessité de restructurer notre réseau énergétique.**

## Construire un monde alimenté par l'électricité

Pour décarboner notre futur système énergétique, les énergies renouvelables doivent remplacer les combustibles fossiles et le système énergétique doit être électrifié de bout en bout. Une telle électrification à grande échelle entraînera non

## La transformation de l'approvisionnement énergétique mondial

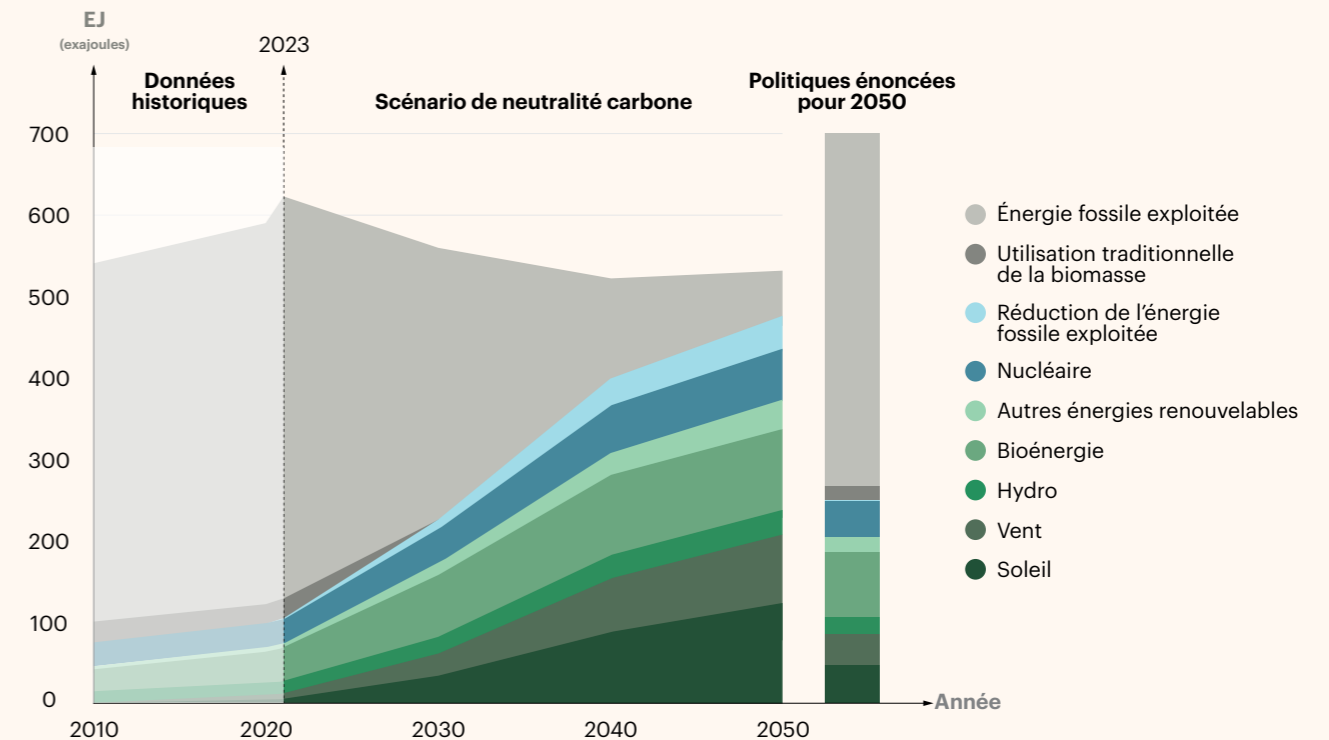


Figure 1 : la transformation nécessaire de l'approvisionnement énergétique mondial si nous voulons atteindre la neutralité carbone, et où nous en serons en 2050 si nous continuons sur la trajectoire actuelle avec les politiques énoncées. Source : Perspectives énergétiques mondiales de l'AIE 2022<sup>16</sup>

seulement une diminution drastique des émissions de gaz à effet de serre, mais entraînera également une diminution substantielle de la demande finale d'énergie et d'importantes économies.<sup>15</sup>

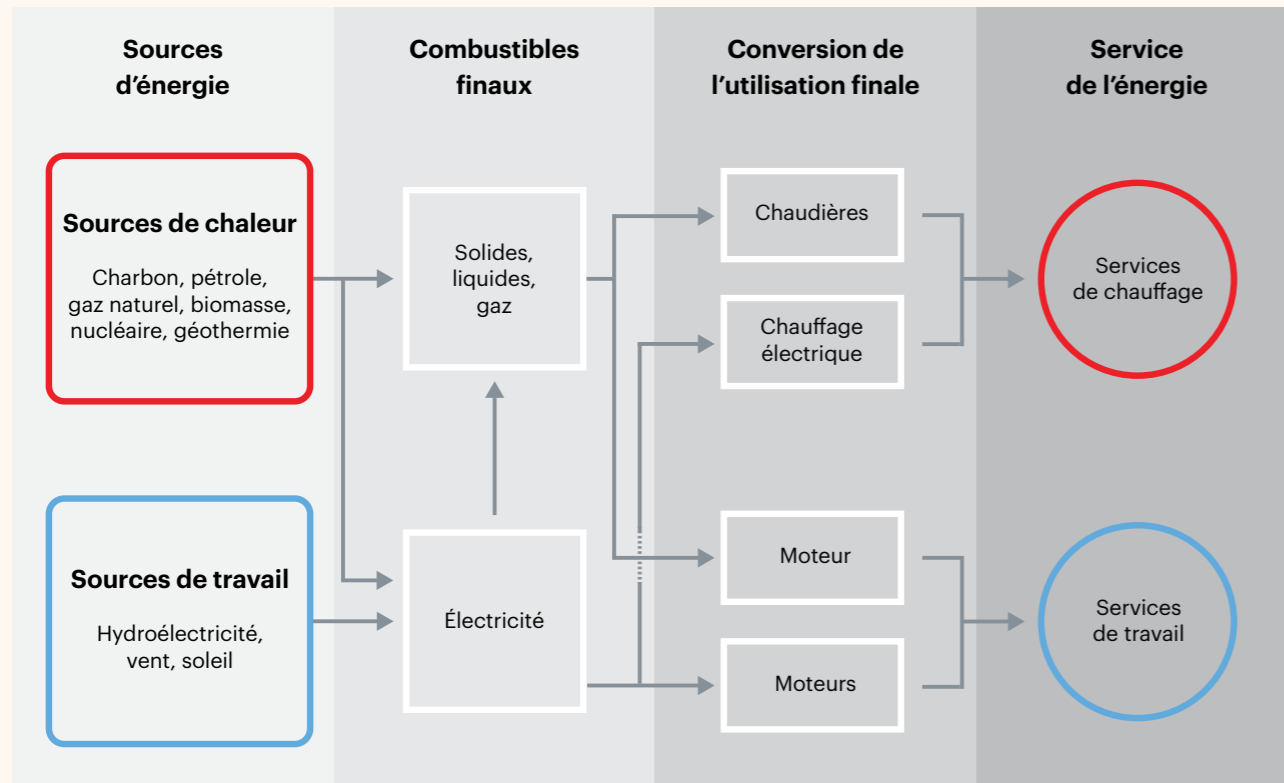
Pour comprendre la grande transformation du réseau, Nick Eyre, professeur à l'Université d'Oxford, a décrit comment il est nécessaire de passer de sources d'énergie productrices de chaleur à des sources d'énergie productrices de travail pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.

Toutes les fonctions de nos économies et de nos sociétés sont alimentées par la chaleur ou par le travail. Les combustibles fossiles sont la principale source d'énergie thermique. Lorsqu'ils sont brûlés, ils se transforment en chaleur, qui est utilisée pour tout, du chauffage des locaux à la propulsion d'une voiture sur la route. Le travail, quant à lui, consiste à utiliser le mouvement, comme une éolienne en rotation, pour alimenter des activités. Comme le montre la figure 1 ci-dessus, cela deviendra l'une des principales sources d'énergie à l'avenir, aux côtés d'autres sources de travail telles que l'énergie solaire et l'hydroélectricité.

À l'heure actuelle, une grande partie de nos sociétés est alimentée par des sources de chaleur qui nécessitent la combustion de combustibles fossiles. Pour décarboner le système énergétique, nous devons transformer fondamentalement la majorité des sources de production de chaleur en producteurs de travail.

Le défi majeur de la transition de la chaleur au travail n'est pas de produire de l'électricité, mais de permettre à l'utilisation finale d'être alimentée par l'électricité. **À l'heure actuelle, environ 80 % de l'énergie destinée à l'utilisation finale n'est pas électrifiée.**<sup>17</sup> Le changement auquel nous sommes confrontés est essentiellement un renversement des changements de la révolution industrielle. Au lieu d'exploiter l'énergie de la chaleur pour alimenter les services qui nécessitent du travail, nous fournirons de l'énergie à partir du travail pour alimenter presque tous les services. En d'autres termes, le travail sera la source des services de chauffage et de travail. Cela signifie que toute la façon dont nous avons pensé notre système énergétique jusqu'à présent sera bouleversée, passant de la conversion de la chaleur en travail, à la conversion du travail en chaleur.

## Chauffage et travail dans le système énergétique actuel



## Chaleur et travail dans le futur système énergétique

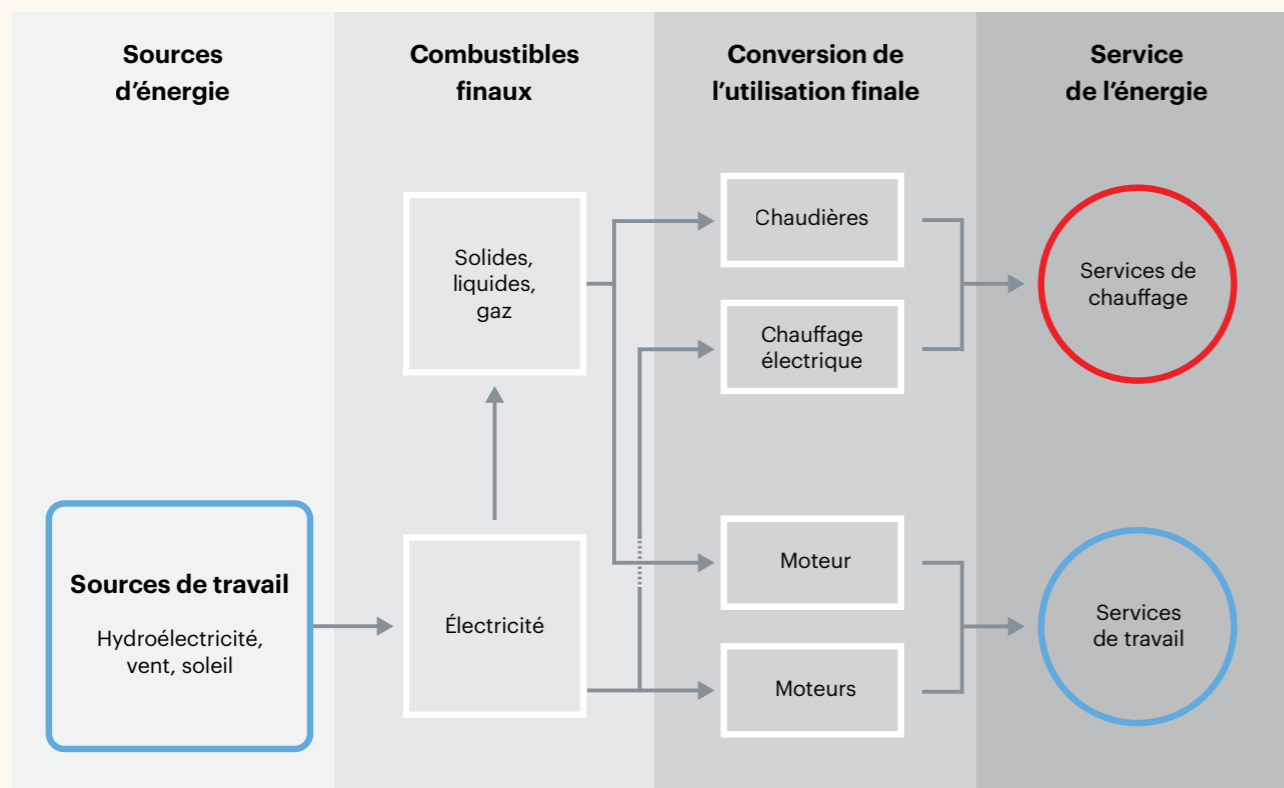


Figure 2 : figure adaptée de Eyre, N. (2021). Les sources d'énergie thermique sont la biomasse, le charbon, le pétrole, le gaz naturel, le nucléaire et la géothermie. Les sources d'énergie du travail sont l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et solaire. Dans le système d'électricité renouvelable, nous nous attendons à ce que l'énergie soit d'origine nucléaire et géothermique, mais cette source est négligeable à l'échelle mondiale. Les services de chauffage sont, par exemple, le chauffage des locaux, le lavage, la cuisson, le séchage, l'élevation de la vapeur et la fonte. Les services de travail sont, par exemple, l'énergie stationnaire, les transports, l'éclairage, le traitement des données et l'électrochimie. Source : Eyre, N. (2021). De l'utilisation de la chaleur à l'utilisation du travail : repenser la transition énergétique zéro carbone. Performance énergétique. 14:77, 1-20.

# Étapes pour électrifier le réseau énergétique

Dans un scénario de neutralité carbone, les sources d'énergie qui doivent changer tout comme la façon dont l'énergie est utilisée. Notre réseau électrique doit être transformé pour fournir les services énergétiques sans sacrifier le confort, la sécurité énergétique ou la croissance économique. Cette transformation passe par :

- 1 Passer à l'électrique dès que possible.** La plupart des énergies renouvelables produisent de l'électricité. Pour s'adapter à l'important développement des énergies renouvelables nécessaire pour atteindre la neutralité carbone, la portée et la profondeur de l'électrification doivent aller beaucoup plus loin. C'est l'objet de la section suivante du document.
- 2 Ne plus produire de chaleur à l'aide de combustibles, mais plutôt la produire à partir d'électricité** – soit directement au moyen de pompes à chaleur, soit indirectement au moyen de système d'énergie collective, comme nous l'expliquons à la page 13. L'électricité est plus efficace que les combustibles pour chauffer à moins de 100 °C, ce qui est plus que suffisant pour le chauffage des locaux ainsi que pour de nombreux processus industriels<sup>18</sup>
- 3 Passer indirectement à l'électrique dans les secteurs difficiles à décarboner.** Même si cela n'est pas encore complètement cartographié, nous devons envisager des alternatives dans des secteurs tels que l'aviation long-courrier, le transport maritime longue distance et certains processus industriels à haute température. L'une des alternatives les plus prometteuses est l'hydrogène à faibles émissions, comme nous le verrons à la page 15.

# L'avenir est électrique

**La transition vers un système énergétique entièrement électrifié pourrait réduire jusqu'à 40 % la consommation finale d'énergie.**<sup>19</sup>

Le 20<sup>e</sup> siècle a été l'âge d'or de l'électrification. Grâce à des percées majeures en matière d'efficacité, de fiabilité et d'application, l'électricité est devenue et reste à ce jour l'infrastructure fondamentale de presque toutes les technologies modernes.<sup>20</sup> Ce n'est que grâce à l'électricité que la part du lion de toutes les percées techniques depuis lors ont été possibles en premier lieu. Imaginez Internet, un réfrigérateur ou une ampoule sans électricité.

Alors, si l'électrification a défini le 20<sup>e</sup> siècle, que pouvons-nous attendre du 21<sup>e</sup> ? Il s'avère que **nous n'avons même pas effleuré la surface de la capacité de l'électricité à transformer nos vies.** Alors que l'électrification a déjà permis l'innovation de millions de technologies qui ont considérablement amélioré la santé humaine et la qualité de vie, nous devons une fois de plus faire appel à elle pour transformer fondamentalement nos sociétés et nos économies. De la même manière que les combustibles fossiles tels que le charbon et le gaz ont alimenté la révolution industrielle, l'électrification alimentera notre futur système énergétique.

## Les voies de l'électrification

Lorsque nous pensons à l'électrification, nous pensons généralement à la conversion de machines qui sont actuellement directement alimentées par des combustibles fossiles – comme les voitures de particuliers – en quelque chose que nous pouvons recharger, idéalement en utilisant des sources d'énergies renouvelables. C'est ce que nous appelons l'électrification directe.

Cependant, l'électrification ne consiste pas seulement à brancher des choses sur une prise. Par exemple, dans le secteur des transports, il peut sembler facile de suivre le même chemin que les voitures de particuliers : rendre tous les véhicules électriques avec batterie et les recharger avec de l'énergie dérivée de sources renouvelables. Mais pour une grande partie du secteur des transports, c'est n'est pas si simple.

Prenons l'exemple des véhicules lourds. Tout d'abord, par rapport aux voitures de particuliers, les véhicules lourds doivent travailler beaucoup plus dur et beaucoup plus longtemps entre les charges, ce qui signifie qu'elles ont besoin de batteries extrêmement grandes pour s'adapter à la productivité de l'équivalent diesel. Deuxièmement, les obstacles opérationnels et logistiques compliquent souvent l'échange de batteries, comme sur le terrain ou sur les grands chantiers de construction. Et troisièmement, il n'existe pas d'énergie renouvelable illimitée dans le réseau et la quantité d'énergie renouvelable supplémentaire nécessaire pour électrifier une flotte d'excavatrices n'est pas négligeable : une estimation approximative indique que si toutes les excavatrices du monde étaient électriques, elles consommeraient autant d'énergie que celle produite par toutes les éoliennes offshore du monde aujourd'hui.<sup>21</sup> Dans de tels cas, les fonctions des machines à énergie fossile, comme les pompes hydrauliques, doivent être électrifiées pour augmenter la performance du moteur. Cette forme d'électrification hybride est une solution très utile à court et moyen terme

## Cas : décarbonation des véhicules lourds



Les engins de construction du monde entier émettent 400 MT de CO<sub>2</sub> par an<sup>22</sup>, soit autant que les émissions de l'aviation internationale.<sup>23</sup> 50 % de cette quantité provient des excavatrices.<sup>24</sup> Les systèmes d'excavatrices d'aujourd'hui ne sont efficaces qu'à 30 %, ce qui signifie que 70 % de l'énergie générée par le moteur est perdue au lieu d'aider le godet de l'excavatrice à déplacer de la terre. Pour identifier les pertes d'énergie d'un véhicule lourd, il ne suffit pas de regarder son moteur. Dans les engins de chantier, un système hydraulique se compose d'une pompe qui met les fluides (huile) sous pression pour transmettre la puissance du moteur afin d'effectuer des travaux tels que soulever ou creuser. Que le véhicule soit équipé d'un moteur électrique ou d'un moteur à combustion, la consommation d'énergie du véhicule peut être considérablement réduite par des mesures de performance énergétique. Par exemple, la consommation d'énergie peut être considérablement réduite lorsque le véhicule n'est pas en fonctionnement grâce à des solutions telles que les pompes à déplacement variable, le déplacement numérique, les pompes à vitesse variable et les entraînements décentralisés.

De telles mesures de performance énergétique permettent aux excavatrices hydrauliques de fournir plus de travail avec un moteur plus petit et moins de carburant. Elles permettent également de réduire la capacité de la batterie nécessaire pour les électrifier jusqu'à 24,8 %.<sup>25</sup> **La technologie se développe rapidement et certaines de ces mesures peuvent permettre de réaliser des économies de carburant de 15 à 30 % pour les excavatrices de plus de 15 tonnes tout en augmentant la capacité de travail des machines.**<sup>26</sup> Bientôt, il sera possible d'appliquer cette technologie à toutes les tailles d'excavatrices et même d'atteindre des économies de carburant allant jusqu'à 50 %.<sup>27</sup>

**15 à 30 %**  
d'économies de carburant grâce  
aux performances énergétiques

pour les engins lourds, notamment dans l'industrie, la construction et le transport maritime. Comme nous pouvons le voir à la page 12, ces améliorations de la performance des véhicules ouvrent également la voie à une électrification complète.

Enfin, de nombreuses parties de notre système énergétique ne pourront pas être transformées en cette forme de machines électriques directes ou hybrides – ou du moins pas de sitôt. Ici, nous pensons souvent à des secteurs tels que l'aviation, le transport maritime longue distance et la production de ciment et d'acier. Pour électrifier directement ces secteurs, il faudrait des batteries trop grandes pour l'engin dans lequel elles seraient utilisées (p. ex. l'aviation) ou d'énormes quantités de chaleur produites (p. ex. le ciment et l'acier). Bien qu'il soit très difficile de les électrifier directement

de manière efficace, ces secteurs sont d'importants émetteurs de GES et, par conséquent, leur électrification contribuerait grandement à réduire les émissions de GES et à atteindre les objectifs de neutralité carbone. C'est là que l'électrification indirecte entre en jeu.

L'électrification indirecte se présente principalement sous la forme d'électrolyse de l'hydrogène. En utilisant l'électricité pour produire de l'hydrogène, l'électricité peut être indirectement stockée ou utilisée comme combustible dans des processus difficiles à électrifier. Nous développerons ce sujet plus en détail dans la section intitulée *La conversion est la clé de la neutralité carbone*, mais nous l'aborderons également ici, car il s'agit d'un élément fondamental d'une électrification à grande échelle de notre futur système énergétique.

## Cas : chauffage électrique efficace

Environ 60 % de toute la demande en chauffage dans le monde est actuellement fournie par des combustibles fossiles<sup>28</sup>, ce qui se traduit par environ quatre gigatonnes d'émissions annuelles de CO<sub>2</sub>, soit 10 % des émissions mondiales.<sup>29</sup> Cela s'explique par le fait que de nombreux bâtiments résidentiels et commerciaux fonctionnent avec d'anciennes technologies de chauffage telles que les chaudières à gaz. Cependant, les pompes à chaleur peuvent fournir le même niveau de chaleur, mais avec une consommation d'énergie plus faible et moins d'émissions de carbone. En effet, la production d'énergie sous forme de chaleur d'une pompe à chaleur est quatre fois supérieure à l'énergie électrique utilisée pour la faire fonctionner pour un foyer normal.<sup>30</sup> **Les pompes à chaleur individuelles sont également 3 à 5 fois plus écoénergétiques que les systèmes à combustible ou à résistance électrique, selon le type de pompe à chaleur.**<sup>31</sup> En effet, elles utilisent l'électricité pour puiser la chaleur préexistante dans l'air, l'eau ou dans des sources souterraines plutôt que d'utiliser le gaz ou l'électricité pour produire de la nouvelle chaleur. En d'autres termes, elles recyclent la chaleur, réduisant ainsi la quantité d'énergie

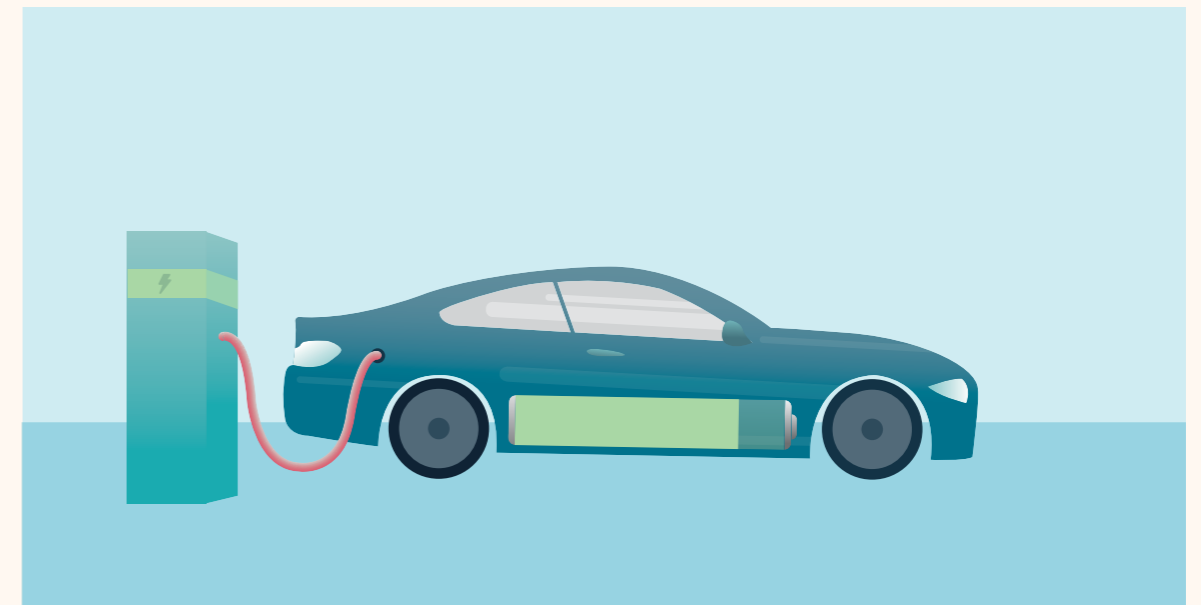
nécessaire pour chauffer le même espace. De plus, les économies de coûts des pompes à chaleur sur les factures d'énergie peuvent être substantielles – jusqu'à 45 % en Allemagne ou même jusqu'à 60 % en France par rapport aux chaudières à gaz, en fonction du prix du gaz et du type de pompe à chaleur installée.<sup>32</sup> L'énergie collective est une bonne alternative aux pompes à chaleur dans les bâtiments individuels, en particulier dans les zones urbaines, car elle permet à différentes sources telles que l'énergie renouvelable et la chaleur excédentaire de pénétrer plus profondément dans le réseau énergétique. Mais les pompes à chaleur peuvent également compléter l'énergie collective. Par exemple, les pompes à chaleur sont utilisées pour améliorer la température du réseau énergétique collectif, si la température est inférieure au niveau requis.

Les pompes à chaleur sont

# 3 à 5 fois

plus efficaces que les systèmes à combustible ou à résistance électrique

## Cas : les véhicules électriques réduisent les émissions



Le transport routier représente plus de 15 % des émissions mondiales liées à l'énergie.<sup>33</sup> Cependant, il est largement admis que les véhicules électriques (VE) sont notre meilleure occasion de réduire ces émissions et d'atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050. En effet, selon l'AIE, les objectifs liés à l'augmentation des véhicules électriques sont parmi les rares qui sont réellement en voie d'atteindre la neutralité carbone.<sup>34</sup> Mais qu'est-ce qui peut aider à réduire considérablement les émissions de carbone dans les véhicules électriques ?

Il est évident qu'ils n'émettent pas de gaz à effet de serre directement dans l'atmosphère et que l'électricité peut être décarbonée. Mais une autre force clé à l'origine de la décarbonation du secteur est que **les systèmes de propulsion électrique des VE sont tout simplement plus efficaces que leurs homologues à combustion, avec une perte d'énergie de seulement 15 à 20 %, contre 64 à 75 % pour les moteurs à essence.**<sup>35</sup> Et cette perte d'énergie peut être encore réduite avec la mise en œuvre de modules

d'alimentation écoénergétiques, ouvrant la voie à une réduction de 5 à 10 % de la taille de la batterie ou à une augmentation de 4 à 10 % de l'autonomie.<sup>36, 37, 38, 39</sup> En d'autres termes, l'énergie résiduelle sera tout simplement moindre à conduire un véhicule électrique sur la même distance, ce qui signifie que les conducteurs peuvent consommer moins pour obtenir le même résultat.

Qu'en est-il de la production ? Bien que la production de véhicules électriques puisse souvent émettre plus de carbone que celle des véhicules à moteur à combustion en raison du processus de fabrication des batteries à forte intensité d'émissions, une étude du MIT estime que ces émissions seraient rapidement compensées en 6 à 18 mois, selon l'origine de l'énergie utilisée pour recharger la voiture.<sup>40</sup> Si ces développements technologiques se poursuivent, les véhicules électriques deviendront de meilleures alternatives aux véhicules à moteur à combustion interne.



# Cas : décarbonation des secteurs difficiles à décarboner



Là où nous ne pouvons pas encore électrifier, nous pouvons au moins décarboner. Par exemple, la production d'acier et de ciment nécessite des températures extrêmement élevées, si élevées que les fours électriques ne peuvent pas encore les produire efficacement. Et, bien que nous assistions à des développements technologiques positifs pour l'électrification des processus à haute température, ceux-ci ne fonctionnent pas actuellement à grande échelle, ce qui nous laisse peu d'options autres que les combustibles fossiles. De même, dans des industries telles que l'aviation et le transport maritime longue distance, les moteurs électriques peuvent produire suffisamment d'énergie. Cependant, ils nécessitent également des batteries qui sont beaucoup trop lourdes et encombrantes pour être pratiques. Dans les deux cas, l'hydrogène est notre meilleur espoir de décarbonation.

Grâce à un processus appelé électrolyse, l'électricité est utilisée pour diviser l'eau en hydrogène et en oxygène. Alors que l'oxygène peut simplement être relâché dans l'atmosphère, l'hydrogène peut être capturé, stocké ou converti en carburants alternatifs,

tels que l'e-ammoniac, l'e-kérosène et l'e-méthanol. Ceux-ci peuvent ensuite être utilisés pour alimenter des industries ou des processus nécessitant des températures élevées ou une mobilité sur de longues distances.

À chaque étape du processus de conversion, une perte d'énergie se produit. Par exemple, lors de la conversion de l'électricité en hydrogène, la perte d'énergie est d'environ 30 %.<sup>41</sup> Lors de la reconversion de cet hydrogène en une forme d'énergie déployable (comme les e-carburants), une perte d'énergie supplémentaire survient, ce qui se traduit par une performance énergétique aller-retour totale de 18 à 42 %.<sup>42</sup> En raison de cette perte d'énergie, ces e-carburants ne sont pas nécessairement plus écoénergétiques que les combustibles fossiles. Cependant, en supposant que l'électricité utilisée pour créer l'hydrogène initial provienne de sources renouvelables, comme la grande majorité le fera dans notre système énergétique de 2050, il s'agit d'une voie viable pour décarboner ces secteurs à forte intensité énergétique, où jusqu'à récemment la décarbonation n'était considérée que comme une chimère.

## Les fondamentaux de la décarbonation

Les exemples ci-dessus montrent tous à quel point l'électrification et la performance énergétique sont étroitement liées. En augmentant la performance énergétique, il devient plus facile et moins cher d'électrifier. Dans le même temps, l'électrification permet de réduire les pertes d'énergie, ce qui en fait une forme de performance énergétique. De plus, tous ces exemples deviennent encore plus efficaces lorsqu'ils fonctionnent au sein d'un système énergétique entièrement alimenté par des énergies renouvelables. Mais voilà le problème : **cela n'est possible que dans un système qui réduit suffisamment la demande en énergie par le biais de mesures de performance énergétique et d'électrification pour garantir que l'offre renouvelable peut répondre à la demande.**

Cela nous ramène au point d'ouverture de cette section : la transformation d'un système d'énergie fossile en un système énergétique entièrement électrifié pourrait réduire jusqu'à 40 % la consommation d'énergie finale.<sup>43</sup> Par exemple, une pompe à chaleur est plus efficace qu'une chaudière à gaz dans des conditions normales, même si l'électricité utilisée pour alimenter cette pompe à chaleur est créée à partir de combustibles fossiles brûlés - bien que l'efficacité varie d'un

combustible à l'autre. En adoptant des technologies électriques, même dans notre système énergétique actuel, nous pouvons réduire les émissions de carbone en diminuant la demande en énergie fossile. Cependant, dans un avenir où l'électricité provient de sources renouvelables, l'efficacité de la pompe à chaleur monte en flèche, car aucune perte d'énergie ne se produit plus bas dans le système lorsque des combustibles sont brûlés pour créer l'électricité. Il en va de même pour la recharge des véhicules électriques ou pour toute autre fonction où l'électricité est utilisée comme source d'énergie primaire.

Si, d'ici 2050, nous voulons faire fonctionner notre monde avec des sources renouvelables, nous devons réduire la demande en énergie grâce à des mesures de performance énergétique et à une refonte électrique complète de nos infrastructures pour y répondre. De même, si nous installons des millions de pompes à chaleur et de bornes de recharge pour véhicules électriques, nous aurons besoin d'électricité renouvelable pour les alimenter et nous assurer qu'elles sont décarbonées de manière holistique. Le fait est que la **performance énergétique, les énergies renouvelables et les technologies électriques doivent toutes être considérées ensemble si nous voulons décarboner complètement notre système énergétique.** Aucun ne peut réussir sans les autres.

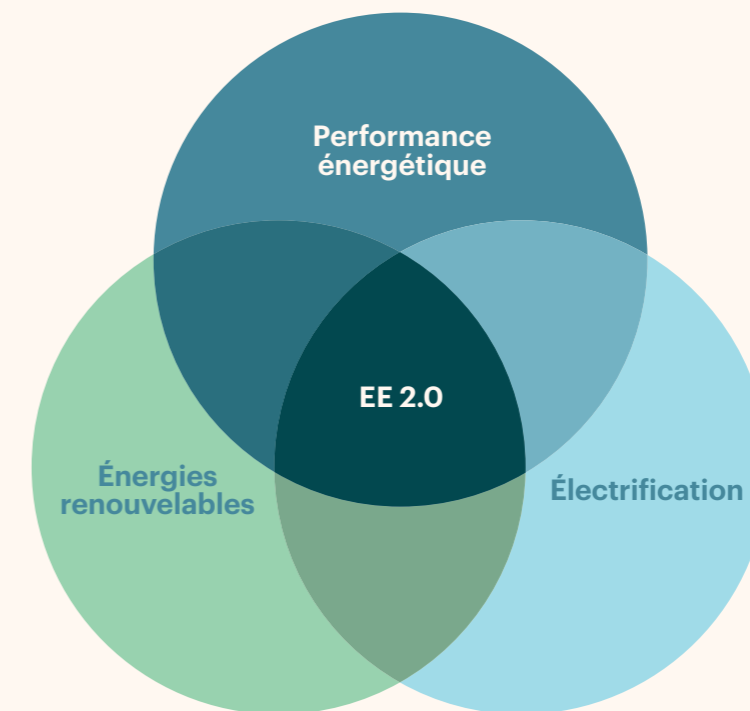


Figure 3 : la performance énergétique, l'électrification et les énergies renouvelables doivent être considérées ensemble si nous voulons atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

« Des technologies électrifiées plus efficaces permettront aux énergies renouvelables de prendre une plus grande part du marché de l'énergie plus rapidement. »

Dr. Jan Rosenow et Prof. Nick Eyre,  
Réinventer la performance énergétique  
pour atteindre la neutralité carbone<sup>44</sup>

# Passer à l'électrique dès que possible

## 1 La performance énergétique peut accélérer l'électrification

L'amélioration de la performance peut accélérer l'électrification. Par exemple, pour les voitures de particuliers, les véhicules lourds et le transport maritime, les mesures de performance peuvent réduire la taille des batteries nécessaires. Cela réduit alors la quantité de puissance de charge nécessaire et la quantité de production d'énergie renouvelable requise, ce qui rend possible et moins chère leur électrification. L'augmentation de la performance peut également réduire la demande d'infrastructure de charge et augmenter la productivité et l'autonomie du véhicule.

## 2 L'électrification, c'est la performance énergétique

L'électrification conduit à des réductions des émissions, à la fois en remplaçant les énergies fossiles par la production d'électricité renouvelable et en économisant de l'énergie grâce aux technologies électriques plus performantes. En effet, une étude de l'Université d'Oxford suggère qu'une **transformation d'un système énergétique fossile en un système énergétique entièrement électrifié pourrait réduire jusqu'à 40 % la consommation d'énergie finale.**<sup>45</sup> En effet, en produisant de l'électricité à partir d'énergies renouvelables plutôt qu'à partir de sources de production de chaleur telles que le charbon ou le gaz naturel, nous ne perdons pas d'énergie sous forme de chaleur (voir la figure 2).

# Flexibilité : le timing est primordial

La façon dont nous utilisons l'énergie tout au long d'une journée est dictée par notre comportement en tant qu'humains. Aux premières heures du matin, la plupart d'entre nous dorment profondément. Les lampadaires sont allumés et le train ne passe que toutes les demi-heures. Mais, lorsque nous nous réveillons pour commencer notre journée, l'eau coule dans les bâtiments, le gaz est allumé dans les cuisines et l'électricité est utilisée dans les foyers. Les enfants vont à l'école et les adultes partent au travail, laissant les maisons vides de consommateurs d'énergie. Cependant, alors que de nombreuses maisons restent vides pendant la journée, le reste de la ville s'anime. Les magasins ouvrent, les bureaux commencent à se remplir et le train arrive plus fréquemment. Après un bref pic pour le déjeuner et une bataille climatisée contre la chaleur de l'après-midi, l'école et le travail se terminent et les familles rentrent chez elles. C'est à ce moment-là que nous sommes avides d'énergie. Les dîners sont préparés, le linge est lavé, les films sont regardés et les lumières s'allument lorsque le jour se transforme en nuit. Après une soirée normale à la maison,

il est temps pour nous, et notre système énergétique, de nous reposer pour la nuit.

Il s'agit d'un exemple de la façon dont la demande en énergie évolue au cours d'une journée de semaine normale dans un réseau énergétique relativement développé. Un futur système énergétique fonctionnant avec des sources d'énergies renouvelables connaîtra également des pics et des creux dans la production d'énergie. Le pic de consommation d'énergie que connaît le réseau électrique lorsque les gens se réveillent ou rentrent chez eux après une longue journée de travail ne s'aligne pas toujours parfaitement avec les périodes d'ensoleillement ou de vents intenses (voir la figure 7 à la page 32).

Ce décalage représente l'un des défis majeurs de notre futur système énergétique. **À l'heure actuelle, même dans les pays où la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique est élevée, les combustibles fossiles sont toujours utilisés comme sources d'énergie résiduelles aux heures pleines, ce qui signifie que nous émettons**

**« L'économie d'une unité d'électricité pendant les heures pleines d'une journée où la production d'énergie renouvelable est faible permet de réaliser beaucoup plus d'économies de carbone et d'avantages environnementaux que d'économiser la même unité pendant les heures de production excédentaire d'énergie renouvelable. »**

Prof. Nick Eyre, Réinventer la performance énergétique pour atteindre la neutralité carbone<sup>46</sup>

**beaucoup plus de CO<sub>2</sub> que nécessaire pendant ces périodes.** Cependant, dans un monde où nous ne pouvons plus faire fonctionner les centrales au gaz naturel pour répondre aux pics de demande, nous devons trouver de nouvelles façons de gérer l'énergie de manière plus flexible. Cette section présente les voies permettant de mettre en place un système énergétique plus flexible, ainsi que de nouvelles données sur les économies d'énergie et de coûts possibles de la mise en œuvre de solutions de flexibilité à grande échelle du côté de la demande.

## Qu'est-ce que la flexibilité du côté de la demande ?

La flexibilité du côté de la demande consiste à utiliser l'énergie renouvelable lorsqu'elle est abondante et à réduire la demande pendant les heures pleines. Il s'agit de niveler la consommation d'énergie, afin que nous ne connaissions pas de périodes de forte demande et de faible offre simultanées. Les principales méthodes pour y parvenir sont les mesures de flexibilité du côté de la demande, telles que le transfert de charge ou l'écrêtage. D'une manière ou d'une autre, ces deux méthodes visent à réduire le pic de demande en énergie, soit en déplaçant la consommation d'énergie hors des périodes de pic de consommation, soit en évitant complètement les

pics en réduisant la consommation d'énergie d'une fonction pour en servir une autre. Essentiellement, l'équipement peut être éteint ou baissé pendant les périodes de pic de demande, choisissant plutôt de l'utiliser à un autre moment. Et bien que ce processus puisse en fait entraîner une consommation d'énergie plus élevée dans certains cas, il est moins problématique – et parfois même moins cher et plus écologique – car l'énergie est utilisée en dehors de la période de pic de demande. Cela réduit la pression sur le réseau énergétique et permet d'économiser de l'argent, car l'énergie est moins chère en période creuse. En effet, **aux États-Unis, l'optimisation de la performance, la flexibilité de la demande et l'électrification des bâtiments peuvent permettre d'économiser jusqu'à 107 milliards de dollars par an sur les coûts du système électrique, ainsi qu'une réduction de 91% des émissions de carbone des bâtiments d'ici 2050.**<sup>47</sup>

Les solutions de flexibilité du côté de la demande deviennent encore plus efficaces lorsqu'elles sont associées à des mécanismes de stockage d'énergie efficaces (voir la section Stockage), car elles peuvent automatiser le stockage de l'énergie pendant les périodes de faible demande pour la déployer lorsque la demande est plus élevée. De la même manière, cela permet aux consommateurs d'utiliser de l'énergie renouvelable bon marché à une époque où l'énergie est autrement chère et à forte intensité de carbone.

## Cas : modèle de régulateurs prédictifs

Les processus de transfert de charge et d'écrêtage peuvent être automatisés grâce à des technologies numériques qui contrôlent comment et quand les équipements ou les machines consomment de l'énergie. Cela passe principalement par la mise en œuvre d'outils numériques connus sous le nom de modèle de régulateurs prédictifs. Dans les bâtiments, par exemple, ces **technologies basées sur l'IA peuvent permettre d'économiser jusqu'à 20 % sur les coûts énergétiques d'un bâtiment en combinant les données du bâtiment, de la météo et de l'utilisateur pour prédire la demande en chauffage et ventilation.** En utilisant ces régulateurs, les bâtiments peuvent préchauffer avant les heures pleines ou réduire le chauffage lorsque le soleil est sur le point de briller

sur les façades du bâtiment, ce qui permet d'économiser de l'énergie. Des observations sur 100 000 appartements équipés de cette technologie, basés principalement en Finlande, ont montré que la consommation d'énergie maximale a été réduite de 10 à 30%.<sup>48</sup> Parallèlement, en déplaçant la consommation vers la période la plus économique, le système permet d'économiser jusqu'à 20 % sur les coûts énergétiques d'un bâtiment, sans nuire au confort des résidents.<sup>49</sup> En 2021, une autorité locale londonienne a installé des régulateurs prédictifs dans huit bâtiments résidentiels. Au cours des 11 premiers mois de fonctionnement, la technologie a permis de rembourser son coût initial et d'économiser 600 MWh de chaleur, soit l'équivalent du chauffage de 50 foyers au Royaume-Uni pendant un an.

# Cas : flexibilité énergétique dans l'UE et au Royaume-Uni



Imaginons un futur où nos voitures se rechargent automatiquement lorsque l'électricité est abondante et la restituent lorsqu'elle est rare. Où le chauffage et la climatisation sont automatisés pour fonctionner pendant les heures de forte demande sans sacrifier le confort. Où les réfrigérateurs des supermarchés peuvent être automatiquement surrefroidis lorsque l'électricité est bon marché. C'est loin d'être un scénario de science-fiction. Beaucoup de ces solutions de flexibilité existent déjà et sont prêtes à être mises en œuvre dès aujourd'hui (voir le cas « Modèle de régulateurs prédictifs »).

Grâce à la flexibilité du côté de la demande, le potentiel d'économie d'énergie, d'émissions et d'argent tout en augmentant la sécurité énergétique est énorme. De nombreuses entités gouvernementales, y compris l'UE, reconnaissent que la flexibilité du côté de la demande est importante pour réussir l'intégration à grande échelle des énergies renouvelables.<sup>50</sup> Cependant, bien que la reconnaissance soit élevée, l'action politique visant à encourager une mise en œuvre

à grande échelle de la flexibilité du côté de la demande ne l'est pas.

Une nouvelle analyse commandée par Danfoss examine le potentiel de flexibilité du côté de la demande sur le marché de gros de l'énergie de l'UE et du Royaume-Uni.<sup>51</sup> Elle constate qu'un **déploiement ambitieux mais réaliste entraînera des avantages sociétaux et environnementaux substantiels, ainsi qu'une réduction des factures d'énergie pour les consommateurs.** Le potentiel réel est peut-être plus important, car cette analyse ne tient pas compte des économies réalisées sur les investissements dans le réseau de distribution et le réseau de transport interne, ni des recettes éventuelles provenant de la vente de services auxiliaires aux gestionnaires de réseau.

La flexibilité du côté de la demande est un outil important pour éliminer progressivement les combustibles fossiles de notre production d'électricité. D'ici 2030, la production annuelle d'électricité à partir du gaz naturel peut être considérablement réduite de 106 TWh, soit environ un cinquième de la consommation

de gaz naturel de l'UE pour la production d'électricité en 2022.<sup>52</sup> De même, **l'UE et le Royaume-Uni peuvent économiser 40 millions de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> par an d'ici 2030**, soit plus que l'empreinte climatique nationale du Danemark en 2021.<sup>53</sup> Parallèlement à cela, **l'UE et le Royaume-Uni peuvent réaliser des économies annuelles de coûts sociétaux de 10,5 milliards d'euros d'ici 2030 et de 15,5 milliards d'euros d'ici 2050**, ce qui inclut une part importante du coût d'établissement de la flexibilité du côté de la demande. Une partie de ces économies en 2050 provient d'une diminution de 21 % des investissements dans les lignes électriques.

**10,5 milliards**  
d'euros d'économies annuelles  
sur les coûts sociétaux d'ici 2030

Lors de la toute récente crise de l'énergie, le Royaume-Uni a alloué 103 milliards d'euros à la crise énergétique, et les pays de l'UE 681 milliards d'euros.<sup>54</sup> L'ensemble de l'UE et le Royaume-Uni peuvent déployer des technologies de flexibilité du côté de la demande et rendre le réseau plus résilient. Cela peut réduire considérablement le besoin de subventions gouvernementales à cette échelle, ainsi que des économies d'argent au niveau de la société et des consommateurs. Dans l'UE et au Royaume-Uni, **le consommateur moyen peut économiser 7 % sur sa facture d'électricité d'ici 2030 et 10 % d'ici 2050.**

Pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris, l'UE et le Royaume-Uni doivent électrifier le système énergétique. Cela nécessitera une expansion majeure de la production d'électricité, y compris de vastes capacités de batteries. Cependant, **avec une mise en œuvre à grande échelle de la flexibilité du côté de la demande, cette expansion de la production d'électricité peut être réduite de 313 GW d'ici 2050, soit environ 10 % de la capacité totale.**

Il s'agit notamment de réduire considérablement le besoin de stockage par batterie à l'échelle du réseau, qui est passé de 298 GW à moins de 2 GW. Pour mettre cela en perspective, la capacité mondiale des batteries était de 28 GW en 2022.<sup>55</sup> Le monde est déjà confronté à des défis pour fournir suffisamment de minéraux bruts rares pour les batteries.<sup>56</sup> En réduisant la demande de batteries, nous mettrons moins de pression sur les chaînes d'approvisionnement en minéraux essentiels et nous limiterons la dégradation de l'environnement qui accompagne l'extraction de minéraux.

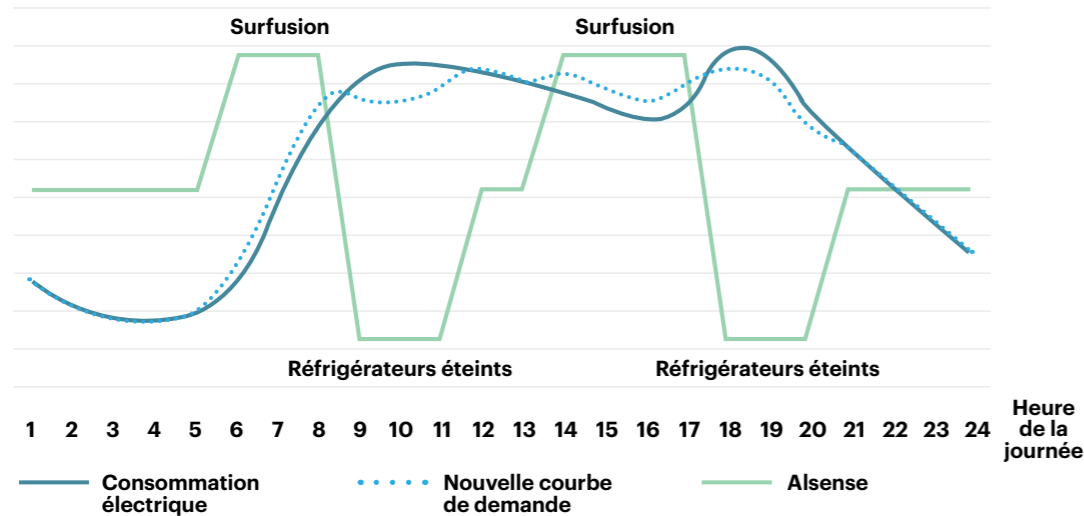
Ne pas déployer la flexibilité du côté de la demande à grande échelle peut avoir des conséquences sociétales et environnementales majeures. **Aujourd'hui, nous payons des centaines de millions de dollars par an aux producteurs d'énergie renouvelable pour qu'ils arrêtent la production en période de trop de vent ou de soleil.<sup>57</sup> Cependant, la flexibilité du côté de la demande peut déjà réduire cette limitation de 25 % d'ici 2030.<sup>58</sup> De même, si nous ne concevons pas un système renouvelable pour faire face aux périodes de faible approvisionnement en énergie, nous risquons des pannes de courant, ce qui peut entraîner des coûts économiques énormes.<sup>59, 60, 61</sup> La flexibilité du côté de la demande sera un outil important pour éviter ces pannes coûteuses.**

**40 millions**  
de tonnes de CO<sub>2</sub> économisées  
chaque année d'ici 2030

Les décideurs politiques devraient donc se poser une question : « **Pouvons-nous nous permettre de passer à côté des opportunités offertes par la flexibilité du côté de la demande ?** »

# Cas : surfusion des congélateurs de supermarchés

Figure 4 : comment Alsense réduit les pics de demande



Les supermarchés représentent 3 % de l'électricité totale utilisée dans les pays industrialisés.<sup>62</sup> Et au sein des supermarchés, les systèmes de réfrigération représentent de loin la plus grande part de l'énergie totale consommée. Cependant, il est possible de réduire la demande en énergie des supermarchés pendant les heures pleines en optimisant ou en déplaçant les charges lors d'un événement de réponse à la demande.

Grâce à des technologies numériques telles qu'Alsense, le transfert de charge peut par exemple être automatisé pour refroidir les congélateurs des supermarchés à une température beaucoup plus basse que celle requise – également appelée surfusion – en dehors des heures de pic de demande, les congélateurs fonctionnant efficacement comme une batterie stockant de l'énergie. Ce faisant, **les réfrigérateurs peuvent être éteints pendant les heures de pic de demande en énergie, ce qui réduit**

**la pression sur le réseau et permet au supermarché d'économiser de l'argent.**

Et bien que le système consomme plus d'électricité que les systèmes de réfrigération conventionnels, en utilisant de l'énergie lorsqu'elle est renouvelable et abondante, les supermarchés peuvent contribuer à réduire le besoin de recourir à des sources d'énergie à forte intensité de carbone en réduisant les pics de demande. Pour en savoir plus, consultez l'étude de cas de Danfoss « Construire de meilleurs supermarchés pour le monde ».<sup>63</sup>

**3 %**

de la demande totale en électricité dans les pays industrialisés proviennent des supermarchés

# Mettre en œuvre des solutions de flexibilité

1

## La flexibilité de la demande en énergie permet de réduire les émissions

En mettant en œuvre des solutions de flexibilité du côté de la demande, la demande en électricité peut être mieux alignée sur les heures de pic d'approvisionnement. Dans l'UE et au Royaume-Uni, **l'abandon de l'utilisation de l'énergie lors des pics de demande à forte intensité de carbone peut permettre d'économiser 40 millions de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> par an d'ici 2030**, soit plus que l'empreinte climatique nationale du Danemark en 2021. De même, **d'ici 2030, la production annuelle d'électricité à partir du gaz naturel pourra être considérablement réduite de 106 TWh**, soit environ un cinquième de la consommation de gaz naturel de l'UE pour la production d'électricité en 2022.

2

## La flexibilité créera des avantages économiques majeurs pour les sociétés et les ménages

Une nouvelle analyse montre qu'un déploiement ambitieux mais réaliste de la flexibilité du côté de la demande entraînera des avantages économiques substantiels à la fois pour les consommateurs et pour la société dans son ensemble. **L'UE et le Royaume-Uni peuvent réaliser des économies sociétales annuelles de 10,5 milliards d'euros d'ici 2030. De plus, le consommateur moyen peut économiser 7 % sur sa facture d'électricité d'ici 2030.**

3

## Réduire le besoin de stockage par batterie à l'échelle du réseau

Avec une mise en œuvre à grande échelle de la flexibilité du côté de la demande, l'expansion de la production d'électricité de l'UE peut être réduite de 313 GW d'ici 2050, soit environ 10 % de la capacité totale. Il s'agit notamment de **réduire considérablement le besoin de stockage par batterie à l'échelle du réseau et de passer de 298 GW à moins de 2 GW**. Pour mettre ce chiffre en perspective, la capacité mondiale des batteries était de 28 GW en 2022.

# La conversion est la clé de la neutralité carbone

Les sources d'énergies renouvelables peuvent produire des quantités incroyables d'électricité à faibles émissions. Cependant, dans les périodes où l'offre en électricité dépasse la demande, les infrastructures d'énergie renouvelable – telles que les éoliennes et les panneaux solaires – sont désactivées. Une trop grande quantité d'électricité déstabilise les fréquences du réseau, risquant des coupures de courant si une partie de l'approvisionnement en énergie n'est pas réduite par les gestionnaires de réseau. Les producteurs d'énergie renouvelable sont, parfois, payés pour arrêter la production pendant un certain temps. En Allemagne, les indemnités d'arrêt de production ont atteint 710 millions d'euros en 2019.<sup>64</sup>

Cependant, comme nous l'avons expliqué à la page 22, la flexibilité du côté de la demande peut déjà réduire cette limitation de 25 % d'ici 2030.<sup>65</sup> Deux des principales méthodes pour y parvenir sont la conversion et le stockage. Dans cette section, nous explorerons les défis et les opportunités liés à la conversion avant de nous concentrer sur le stockage dans la section suivante.

## Qu'est-ce que la conversion ?

La conversion est à la fois très simple et étonnamment complexe. En termes simples, il s'agit de changer une forme d'énergie par une autre. Il peut s'agir du vent à l'électricité, de l'électricité à l'hydrogène ou d'une tout autre combinaison. Cependant, dans la pratique, réussir à convertir de l'énergie nécessite d'incroyables prouesses d'ingénierie. La maîtrise de la science et la mise en œuvre de la conversion de l'énergie

seront fondamentales si nous voulons décarboner notre système énergétique.

Dans notre futur système énergétique, la quasi-totalité de notre énergie proviendra de la conversion de sources renouvelables comme le soleil et le vent en électricité utilisable. De plus, la conversion de l'hydrogène sera un mécanisme important pour le stockage de l'énergie. Analysons plus en détail comment nous pouvons fournir suffisamment d'électricité pour soutenir la production d'hydrogène et comment la production peut aider à stabiliser le réseau.

## Les besoins futurs en hydrogène seront considérables

**Nous aurons besoin de grandes quantités d'hydrogène à faibles émissions à l'avenir pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.**

D'une part, l'hydrogène est un outil utile pour stocker l'électricité renouvelable excédentaire. Cependant, il est également vital dans les industries pour produire de l'acier à faibles émissions, de l'e-ammoniac, de l'e-méthanol et d'autres e-carburants où il remplace les combustibles fossiles. De plus, il a le potentiel d'être un carburant durable à faibles émissions pour les zones difficiles à réduire comme le transport maritime international longue distance, les camions lourds et même les avions. Et bien que les estimations varient d'une étude à l'autre, l'essentiel est que la part de l'hydrogène dans le mix énergétique ne fera que croître.<sup>66, 67, 68, 69</sup>

Mais comment atteindre ces objectifs ambitieux en matière d'hydrogène ? À l'avenir, l'électrolyse de l'eau, c'est-à-dire le processus de conversion de l'électricité en hydrogène et en oxygène, sera massivement développée. Si l'électricité utilisée pour alimenter ce processus est produite par des sources renouvelables, nous pouvons indirectement électrifier et décarboner tout ce qui peut fonctionner à l'hydrogène ou aux e-carburants générés à l'hydrogène. Cependant, l'électrolyse nécessite une énorme quantité d'électricité – l'AIE estime que nous aurons besoin de 11 EJ supplémentaires d'hydrogène d'ici 2030 et de 54 EJ d'ici 2050.<sup>70</sup> Pour mettre cela en perspective, **la production d'hydrogène nécessitera plus de la moitié de la demande totale en électricité d'aujourd'hui.**<sup>71, 72, 73, 74</sup> Cela créera inévitablement un besoin d'expansion rapide de l'offre d'électricité à faibles émissions, et cela pourrait s'avérer être l'un des plus grands défis pour l'avenir de l'approvisionnement du réseau.

Il faudra des investissements substantiels pour produire l'hydrogène à faibles émissions requis en 2050.<sup>75</sup> Mais de quelle quantité d'hydrogène aurons-nous réellement besoin à l'avenir ? L'UE prévoit de produire et d'importer un total de 666 TWh d'hydrogène d'ici 2030, tous produits à partir de sources à faibles émissions.<sup>76</sup> Cela équivaut à la production énergétique d'environ

140 centrales nucléaires.<sup>77</sup> Une analyse suggère **que l'UE peut réduire les besoins en hydrogène à environ 116 TWh – moins d'un cinquième – en se concentrant sur la performance énergétique et l'électrification tout en développant massivement l'énergie solaire et éolienne, le chauffage collectif et les pompes à chaleur à haut rendement.**<sup>78</sup> Quoi qu'il en soit, 116 TWh d'hydrogène d'ici 2030 restent ambitieux et nécessiteront une énorme quantité d'électricité, ce qui posera des défis majeurs à la stabilité et à la sécurité du réseau énergétique.

## La production d'hydrogène peut stabiliser le réseau

L'ensemble du système énergétique, y compris les prises de courant de votre maison, est réglé sur une tension et une fréquence spécifiques et stables. Beaucoup d'ingénierie est nécessaire pour maintenir cette fréquence sur le réseau. Cependant, cette fréquence idéale peut être déstabilisée en cas de décalage entre l'offre et la demande en électricité, ce qui peut entraîner des problèmes d'approvisionnement en énergie. Les centrales thermiques ont de grandes masses en rotation sous la forme d'énormes turbines qui servent efficacement de stabilisateurs pour le réseau.

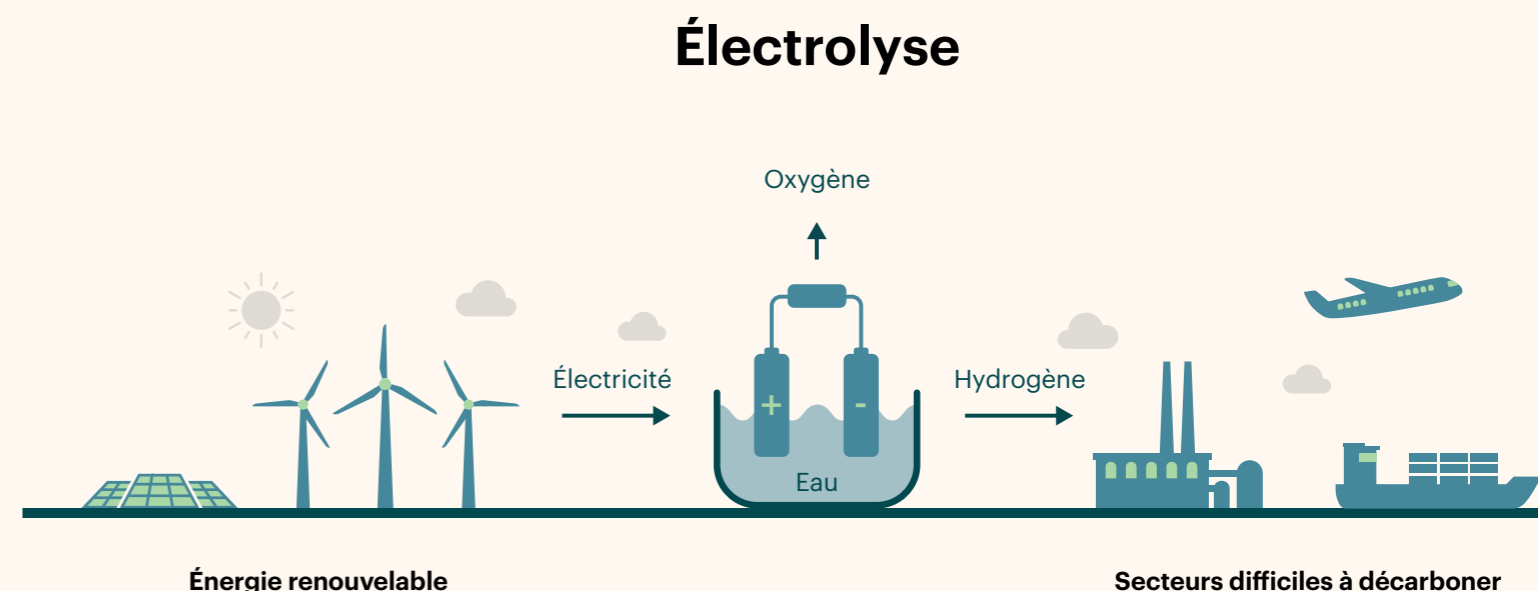


Figure 5 : convertir l'électricité renouvelable en hydrogène par électrolyse

En d'autres termes, lorsque la demande augmente, la centrale électrique peut fournir plus d'énergie au réseau à court terme, ce qui laisse suffisamment de temps à la société de réseau pour mettre plus de vapeur dans la turbine, tout comme si vous appuyiez plus fort sur la pédale d'accélérateur pour maintenir la même vitesse à l'approche d'une montée.

Dans le futur système énergétique, nous passerons des centrales électriques aux sources renouvelables décentralisées. Ces nouvelles sources n'ont pas de masses stabilisatrices en rotation sous la forme d'énormes turbines, nous devons donc penser à d'autres moyens de stabiliser notre réseau. Pour des périodes plus courtes, les batteries peuvent être très efficaces pour combler l'écart déstabilisant entre l'offre et la demande. Pour les périodes de déséquilibre plus longues, par exemple lorsque le vent souffle pendant des jours ou des semaines, l'électricité dans le système est trop importante. Dans ces périodes, **l'augmentation de la production d'hydrogène peut aider à adapter la demande en électricité à la production et donc la production d'hydrogène elle-même peut fonctionner comme un mécanisme de stabilisation.**

Au-delà des avantages que l'hydrogène peut apporter à la stabilité du réseau et à la sécurité énergétique, il peut également contribuer à réduire les coûts. Selon la loi fondamentale de l'offre et de la demande, l'électricité est bon marché lorsque la production est élevée, et elle est chère lorsque la production est faible – ou plutôt, lorsque la demande dépasse la production. Mais la production d'hydrogène peut être augmentée ou diminuée en fonction du prix de l'électricité. Ainsi, une fois que toutes les infrastructures nécessaires seront en place, il sera économiquement logique de produire de l'hydrogène en période de forte production d'électricité et de faible demande, garantissant ainsi une utilisation rentable de l'énergie renouvelable excédentaire lorsqu'elle est disponible.

## Utiliser l'hydrogène de la bonne manière

L'hydrogène est un vecteur énergétique efficace et les utilisations finales sont nombreuses. Cependant, comme pour toutes les formes d'énergie, nous devons utiliser l'hydrogène aussi efficacement que possible si nous voulons passer à des sources d'énergies renouvelables.

Un exemple d'utilisation inefficace de l'hydrogène serait le chauffage des locaux. Si nous devons fournir au Royaume-Uni un chauffage domestique à partir d'hydrogène à faibles émissions produit par des parcs éoliens offshore, nous aurions besoin d'une capacité de 385 GW pour produire suffisamment d'hydrogène pour chauffer le pays. Cependant, la capacité mondiale d'énergie éolienne offshore ne devrait augmenter que de 380 GW au cours des dix prochaines années.<sup>79</sup> Mais si nous chauffions plutôt le Royaume-Uni avec des pompes à chaleur et de l'énergie collective, nous n'aurions besoin que d'une capacité de 67 GW de parcs éoliens offshore, et encore moins d'énergie si nous alimentons les zones les plus densément peuplées en chauffage collectif – de cette façon, il serait également plus facile d'utiliser la chaleur excédentaire des bâtiments et des processus environnants pour chauffer les maisons locales. Les parcs éoliens offshore pour la solution hydrogène occuperaient 52 000 km<sup>2</sup>. Cependant, il ne faudrait que 9 000 km<sup>2</sup> pour que les parcs éoliens offshore alimentent les pompes à chaleur. Globalement, il faudrait un sixième de l'énergie pour que les Britanniques passent l'hiver avec des pompes à chaleur au lieu de l'hydrogène<sup>80</sup>, et encore moins si les pompes à chaleur étaient combinées à l'énergie de collective.

Comme indiqué ci-dessus, cependant, il existe de nombreuses bonnes utilisations de l'hydrogène. **Pour les zones difficiles à décarboner, nous ne pouvons pas compter sur les batteries**, car les batteries des porte-conteneurs ou de l'aviation internationale seraient tout simplement trop grosses. Cependant, **nous pouvons produire des e-carburants à partir de l'hydrogène, ce qui réduira les émissions du secteur des transports.** À l'avenir, nous nous attendons à voir des navires fonctionnant à l'e-ammoniac et à l'e-méthanol, et des avions fonctionnant à l'e-kérosène, tous produits avec de l'hydrogène plutôt qu'avec des sources fossiles. D'autres industries, telles que **la production d'acier, nécessitent des températures extrêmement élevées, et l'hydrogène peut également jouer un rôle essentiel dans la décarbonation.**

## Chauffer le Royaume-Uni avec des pompes à chaleur ou de l'hydrogène Vert

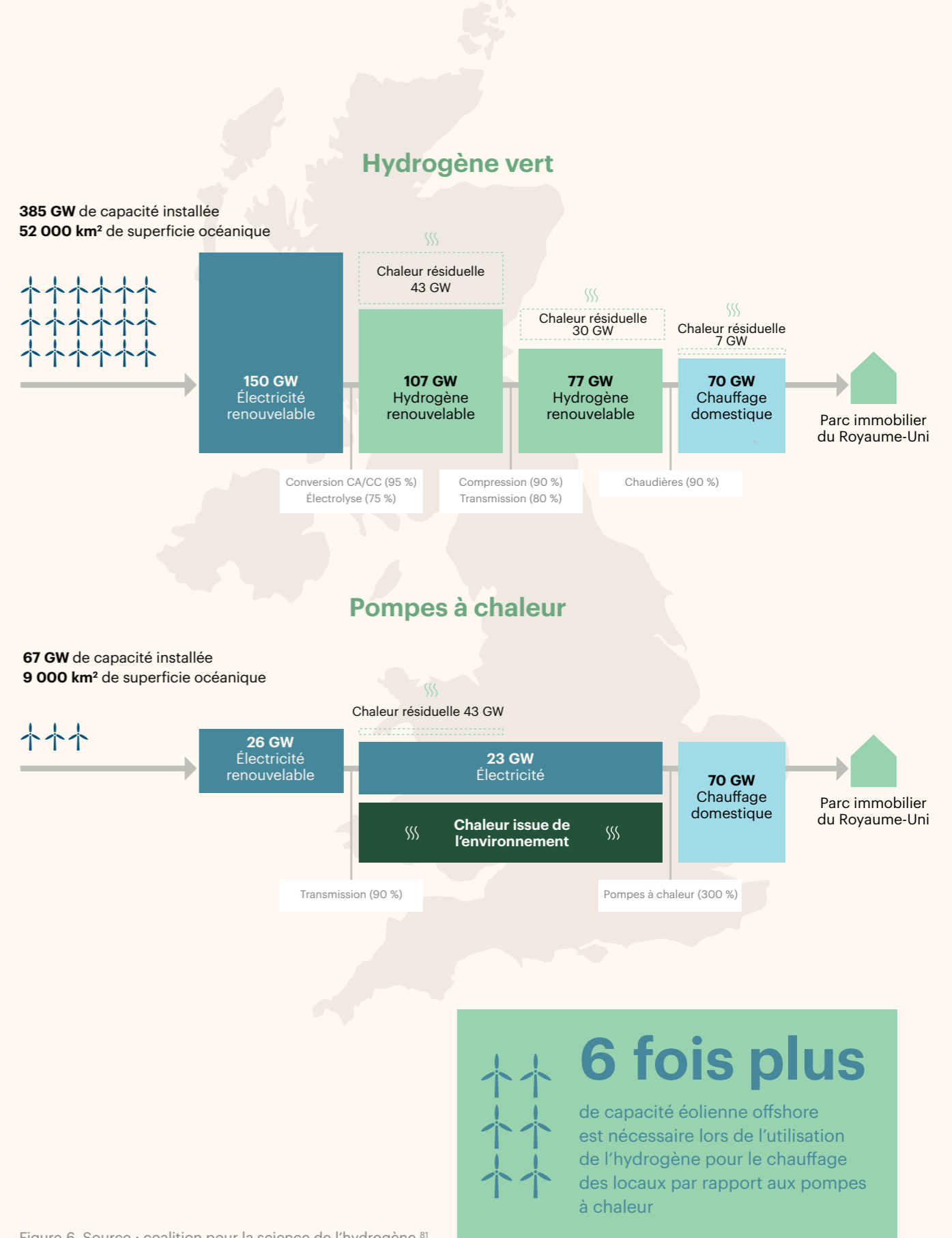


Figure 6. Source : coalition pour la science de l'hydrogène.<sup>81</sup>

## Cas : de bons convertisseurs peuvent permettre d'économiser de l'électricité et de l'argent



La production d'hydrogène aura un impact considérable sur le réseau électrique futur, nous devons donc nous assurer de produire de l'hydrogène aussi efficacement que possible et de ne pas créer de perturbations inutiles sur le réseau. L'hydrogène est produit par un électrolyseur qui divise l'eau en oxygène et en hydrogène à l'aide d'électricité. Tous les électrolyseurs utilisent du courant continu (CC), tandis que le réseau électrique est alimenté par du courant alternatif (CA). Le courant continu se trouve dans les batteries AAA ordinaires, et le courant circule toujours dans une direction, tandis que le courant alternatif dans le réseau change régulièrement de direction. Cela signifie qu'il est nécessaire de convertir l'électricité du courant alternatif au courant continu pour produire de l'hydrogène. Un convertisseur CA/CC de mauvaise qualité perturbera le courant alternatif sur le réseau, et un équipement de compensation sera nécessaire pour rétablir la qualité de l'alimentation.

De telles perturbations du réseau par des convertisseurs de mauvaise qualité sont une préoccupation croissante du débat sur la production d'hydrogène. De plus, un tel convertisseur fournira un courant continu de mauvaise qualité à l'usine

d'électrolyse. Cependant, il existe déjà de meilleurs convertisseurs sur le marché aujourd'hui. Ceux-ci ne créent pratiquement aucune perturbation sur le réseau, rendant l'équipement de compensation obsolète, tout en fournissant une alimentation en courant continu plus propre à l'usine d'électrolyse. L'approvisionnement en courant continu plus propre peut augmenter l'efficacité globale de la production d'environ 1%.<sup>82</sup> Et, bien que cela puisse sembler peu, 1% de la demande future en électricité pour l'hydrogène est en fait suffisant pour alimenter Londres pendant près de quatre ans, **ce qui réduit les coûts de l'électricité dans l'ensemble du réseau.**<sup>83</sup> De même, une partie du coût des convertisseurs de meilleure qualité peut être compensée par la réduction du besoin d'équipement de compensation et de la maintenance qui s'ensuit. Parfois, un meilleur équipement peut simplifier un système et améliorer la résilience du réseau.

De bons convertisseurs permettent d'économiser suffisamment d'électricité pour alimenter Londres pendant

**4 ans**

# Utiliser l'hydrogène à bon escient

## 1 La conversion de l'électricité en hydrogène sera essentielle pour une décarbonation profonde

L'énergie renouvelable excédentaire peut être convertie et stockée sous forme d'hydrogène. Et bien que cette conversion s'accompagne d'une perte d'énergie, l'hydrogène sera essentiel pour décarboner les secteurs difficiles à décarboner tels que la production d'acier, le transport maritime longue distance et l'aviation long-courrier.

## 2 Une production efficace d'hydrogène est essentielle

La production d'hydrogène aura un impact considérable sur le réseau électrique futur, nous devons donc nous assurer de produire de l'hydrogène aussi efficacement que possible et de ne pas créer de perturbations inutiles sur le réseau. En utilisant des convertisseurs performants, nous pouvons économiser de l'électricité et de l'argent.

## 3 L'hydrogène doit être utilisé à bon escient

L'utilisation de l'hydrogène pour le chauffage est extrêmement inefficace. Si nous devons fournir au Royaume-Uni un chauffage domestique à partir d'hydrogène à faibles émissions produit par des parcs éoliens offshore, nous aurions besoin d'une capacité de 385 GW pour produire suffisamment d'hydrogène pour chauffer le pays. Avec les pompes à chaleur, une capacité de seulement 67 GW de parcs éoliens offshore serait nécessaire, et encore moins si les zones densément peuplées étaient alimentées en chauffage collectif.



# Stockage pour l'énergie du futur

Le stockage de l'énergie sera essentiel dans le réseau intelligent du futur. Un réseau plus décentralisé implique un plus grand besoin de stocker de l'énergie afin de pouvoir fournir de l'électricité lorsque la nature n'offre pas de conditions favorables. En effet, la capacité de stockage installée mondiale devrait augmenter de 56 % entre 2020 et 2026, principalement en raison d'un besoin accru de flexibilité et de stockage dans le monde entier pour intégrer une part croissante des énergies renouvelables.<sup>84</sup>

Le stockage de l'énergie n'est pas une tâche simple ou bon marché, il est donc nécessaire de prendre les bonnes mesures pour décider où appliquer quelle technologie. Le choix de la bonne solution dépendra de nombreux facteurs tels que la géographie, la source d'énergie, l'utilisation des sols, la durée du stockage et la durée pendant laquelle l'électricité doit être extraite du stockage d'énergie. Dans le domaine du stockage de l'énergie, il existe de nombreuses technologies – certaines bien établies, d'autres à la pointe de la technologie – qui peuvent être déployées. À la page suivante, nous présentons quelques-unes des technologies clés et démontrons leur potentiel.

## Stockage à court et à long terme

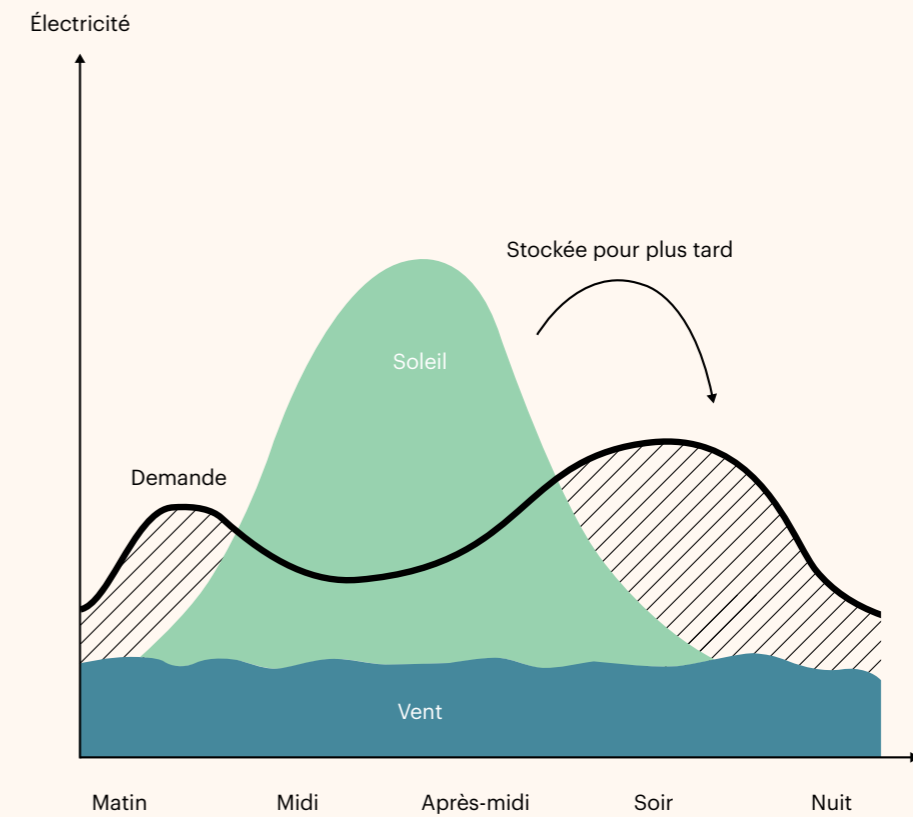
Au quotidien, le soleil produit un surplus d'électricité avant le pic de demande (voir figure 7), et pourtant nous ne pouvons compter entièrement sur les énergies renouvelables que si nous stockons cet excédent d'électricité pour le soir et la nuit. Parmi les solutions idéales pour le stockage à court terme, citons les batteries lithium-ion et le stockage thermique, par exemple pour l'énergie collective. **Les systèmes d'énergie collective sont d'excellentes solutions pour stocker l'énergie thermique lorsque le réseau contient beaucoup d'électricité verte.** Ils peuvent fournir du chauffage

ou du refroidissement à la demande et servir de stockage d'énergie pendant des heures ou des mois, ce qui en fait des excellents catalyseurs de flexibilité du côté de la demande (en savoir plus sur la flexibilité du côté de la demande à la page 20).

Tout comme les pics quotidiens de consommation électrique, des variations saisonnières existent également. Aux latitudes plus élevées de la Terre, il est nécessaire de chauffer les maisons pendant l'hiver, tandis que les pays de latitude moyenne à basse auront une demande plus élevée de climatisation pendant l'été. De même, les latitudes plus élevées connaîtront également un écart entre produire plus d'électricité renouvelable en été et avoir le plus grand besoin d'électricité en hiver. Pour combler cette écart, nous devons examiner les options de stockage à long terme. En raison de l'épuisement des coûts et de la capacité au fil du temps - pensez aux anciennes AAA au fond du tiroir de la cuisine - les batteries sont une solution inefficace. De bien meilleures options pour le stockage à long terme sont le stockage thermique, l'hydrogène et l'hydroélectricité par pompage-turbinage, qui peuvent contenir de grandes quantités d'énergie avec seulement une très faible perte d'énergie au fil du temps et à un faible coût par MWh.

Un autre facteur important dans le choix de la solution de stockage à utiliser est le coût. Les prix du stockage baissent généralement d'une technologie à l'autre, et plus le stockage est grand, moins le prix est élevé par unité stockée. Même si nous nous attendons à ce que toutes les technologies soient moins chères à l'avenir, le stockage thermique, l'hydrogène et l'hydroélectricité par pompage-turbinage sont actuellement les moins chers et devraient rester relativement bon marché.<sup>85</sup> Nous nous attendons à ce que le prix des batteries lithium-ion baisse, mais elles dépendent beaucoup des minéraux essentiels et, par conséquent, le prix est également affecté par l'approvisionnement en minéraux.<sup>86</sup>

## Stockage à court terme



## Stockage à long terme

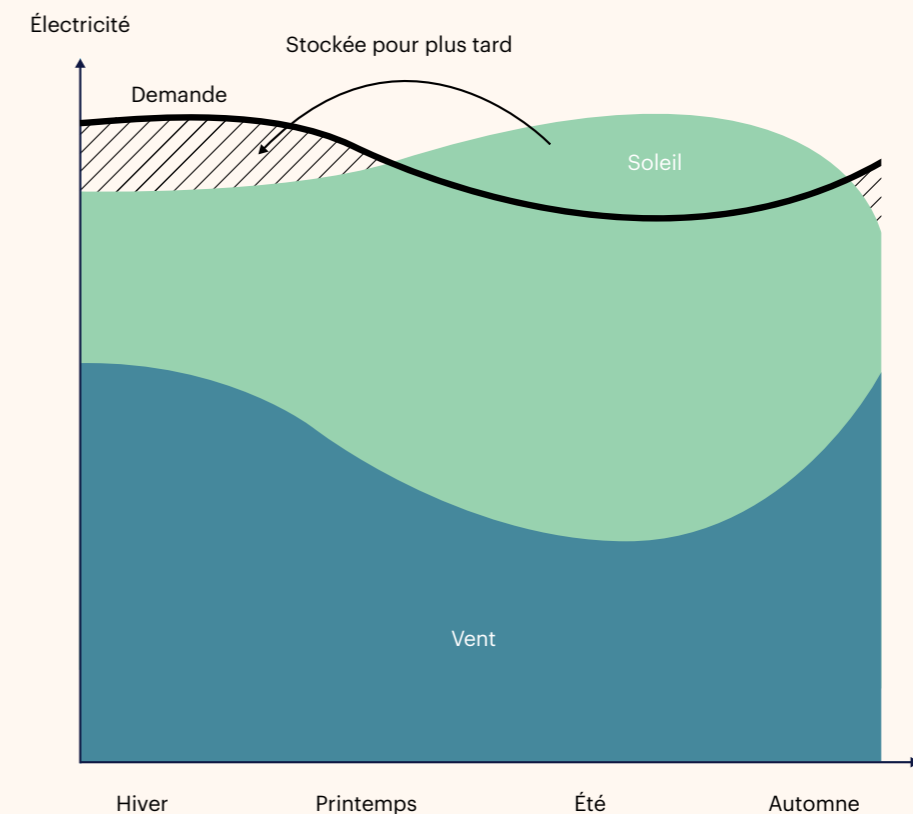


Figure 7 : stockage à court et à long terme



## Stockage thermique grâce à l'énergie collective

Le stockage de l'énergie thermique consiste à chauffer ou à refroidir un fluide pour utiliser l'énergie en cas de besoin ultérieur. Dans sa forme la plus simple, cela pourrait signifier l'utilisation d'un réservoir d'eau pour le stockage de la chaleur. L'eau serait chauffée à des moments avec beaucoup d'énergie, et l'énergie serait ensuite stockée dans l'eau pour être utilisée lorsque l'énergie est moins abondante. Le stockage de l'énergie thermique peut également être utilisé pour équilibrer la consommation d'énergie entre le jour et la nuit.

Les systèmes d'énergie collective modernes disposent d'une infrastructure thermique flexible où les sources d'énergie disponibles peuvent être « branchées ». L'énergie, sous forme d'eau chaude ou glacée, peut ensuite être distribuée aux bâtiments via un réseau de canalisations pour une utilisation immédiate ou être stockée dans des réservoirs thermiques pour une utilisation ultérieure. Avec les réservoirs de stockage de chaleur, l'énergie thermique peut être stockée pendant quelques heures ou quelques jours. Avec des fosses plus grandes ou d'autres installations de stockage, elle peut être stockée jusqu'à plusieurs mois. De cette façon, les systèmes d'énergie collective peuvent apporter de la flexibilité au système énergétique grâce à deux fonctions clés : en fournissant un stockage et en permettant une commutation entre différentes sources d'énergie telles que les pompes à chaleur à grande échelle, la chaleur résiduelle, le stockage solaire thermique et la géothermie.<sup>87</sup>

## Hydrogène

L'énergie peut être stockée sous forme d'hydrogène en convertissant l'électricité à faibles émissions en hydrogène par électrolyse. Il existe plusieurs façons viables de stocker l'hydrogène à grande échelle, des cavernes de sel au gaz comprimé dans des réservoirs<sup>88</sup>, et l'hydrogène peut être stocké sans perte d'énergie sur une longue période. Il est donc idéal pour l'équilibrage énergétique saisonnier.<sup>89</sup> De plus, les conduites de gaz naturel actuelles peuvent être convertis pour l'hydrogène.<sup>90</sup> De cette manière, il est possible d'utiliser l'électricité excédentaire à faibles émissions d'un endroit donné pour approvisionner une autre région lointaine en énergie, créant essentiellement un marché de l'hydrogène similaire au marché actuel du gaz naturel.

Le stockage de l'hydrogène a de nombreuses utilisations potentielles, mais n'est pas aussi efficace que d'autres formes de stockage telles que les batteries. Le processus de conversion de l'électricité en hydrogène en électricité peut avoir une performance énergétique aussi faible que 18 %<sup>91</sup>, car chaque processus de conversion s'accompagne d'un certain degré de perte d'énergie. La perte d'énergie est également importante lors de l'utilisation de l'hydrogène dans les industries pour atteindre des températures élevées ou pour produire des e-carburants destinés au transport maritime et à l'aviation. Dans ces zones difficiles à réduire, nous devons peut-être accepter une perte d'énergie pour pouvoir décarboner, et les développements technologiques feront des e-carburants une option économiquement viable.<sup>92</sup> Pour l'instant, il est très cher de stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène, mais le prix devrait diminuer à l'avenir avec les futurs développements technologiques.<sup>93, 94</sup> Vous pouvez en savoir plus sur l'hydrogène aux pages 25 à 30.



## Hydroélectricité par pompage-turbinage

L'hydroélectricité par pompage-turbinage utilise l'électricité excédentaire pour pomper l'eau vers un réservoir plus élevé, et lorsque l'électricité est nécessaire, l'eau est relâchée à une altitude plus basse par des turbines qui produisent de l'électricité.<sup>95</sup> Aujourd'hui, l'hydroélectricité par pompage-turbinage est la technologie de stockage la plus largement déployée, représentant 90 % du stockage total d'électricité en 2020.<sup>96</sup>

Il est bon marché de stocker de l'énergie sous forme d'hydroélectricité par pompage-turbinage, même pour de très grandes installations<sup>97</sup>, et elle peut fournir de l'énergie pendant des heures ou plusieurs semaines.<sup>98</sup> Cependant, bien que la technologie soit éprouvée et bon marché, il est largement admis qu'il existe peu d'emplacements appropriés pour construire de nouvelles installations.<sup>99</sup> L'hydroélectricité par pompage-turbinage est un stockage d'énergie à faibles émissions, mais nous devons garder à l'esprit qu'il peut y avoir des impacts négatifs sur l'environnement et la biodiversité en cas de barrage de grands réservoirs hydroélectriques.<sup>100</sup>



## Batteries lithium-ion

Les batteries sont une solution de stockage viable à court terme. Bien qu'elles soient encore chères, les batteries lithium-ion ont vu leur prix baisser au cours de la dernière décennie. Ces batteries à l'échelle du réseau sont gourmandes en ressources et, même si elles deviennent de moins en moins chères, elles dépendront toujours des prix des minéraux essentiels. La capacité mondiale actuelle de stockage par batterie est bien inférieure à celle de l'hydroélectricité par pompage-turbinage, mais nous nous attendons à ce qu'elle augmente considérablement, passant de 28 GW en 2022 à 967 GW en 2030, rattrapant ainsi la capacité mondiale d'hydroélectricité par pompage-turbinage.<sup>101</sup>

Cependant, chacun de ces mécanismes de stockage présente des avantages spécifiques. Les batteries sont particulièrement adaptées à la combinaison avec des panneaux solaires, en particulier dans les zones où l'ensoleillement est prévisible et stable, comme les zones semi-arides et arides. En effet, vous pouvez adapter le stockage de la batterie aux besoins en électricité en dehors des heures ensoleillées. Les batteries présentent cependant deux inconvénients majeurs : 1) leur nombre de cycles est limité, et 2) les considérations environnementales, en particulier la dépendance des batteries à l'exploitation minière intensive pour les minéraux essentiels. Mais les développements technologiques évoluent rapidement, et il est probable que nous pourrions bientôt avoir des batteries capables de maintenir leurs performances pendant 25 à 30 ans.<sup>102</sup>

# Réutiliser l'énergie grâce à l'intégration sectorielle

L'énergie renouvelable n'est pas une ressource inépuisable. Cependant, dans un système énergétique entièrement électrifié, la demande en électricité renouvelable sera énorme. Par conséquent, nous devons utiliser pleinement toutes les sources d'énergie disponibles dans tous les secteurs, notamment la chaleur excédentaire. Partout dans notre système énergétique, de l'énergie est perdue dans l'atmosphère sous forme de chaleur. Cette **chaleur excédentaire est un géant endormi de la performance énergétique**. Lorsqu'elle est stratégiquement captée et déployée en tant qu'énergie, elle a un potentiel incroyable pour remplacer des quantités importantes de sources d'énergie précieuses telles que les combustibles fossiles et l'électricité, ce qui permet d'économiser de l'argent et de réduire les émissions de GES.

L'intégration sectorielle consiste à combiner différents secteurs pour travailler ensemble de manière plus efficace et plus durable. Au lieu de traiter chaque secteur séparément, l'intégration sectorielle vise à trouver des moyens de les faire coopérer, de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité globale du système. Elle contribue également à réduire la pression sur le réseau énergétique en permettant une plus grande exploitation des sources d'énergie alternatives telles que la chaleur excédentaire.

## Potentiels de la chaleur excédentaire

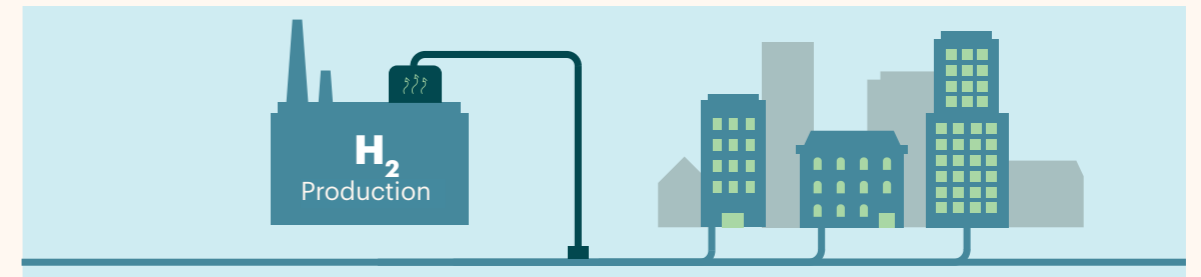
Chaque fois qu'une machine fonctionne, elle génère de la chaleur. Prenez simplement à la chaleur derrière votre réfrigérateur. Il en va de même à plus grande échelle avec **les supermarchés, les centres de données, les installations de traitement des eaux usées**

**et les installations d'électrolyse de l'hydrogène** situés dans les villes du monde entier. D'ici 2030, jusqu'à 53 % de l'apport énergétique mondial sera perdu sous forme de chaleur excédentaire.<sup>103</sup> De plus, le climat peut grandement bénéficier de la récupération de la chaleur excédentaire. En effet, nous pouvons réduire les émissions mondiales de 10 à 19 % si nous récupérons tout le potentiel théorique de la chaleur excédentaire.<sup>104</sup>

Le chauffage est l'un des plus gros consommateurs d'énergie du système. En Europe, le chauffage représente plus de 50 % de la consommation finale annuelle d'énergie, et la majeure partie de la chaleur européenne est encore produite à partir de sources de combustibles fossiles, dont près de la moitié est du gaz naturel.<sup>105</sup> Dans le même temps, toutes les zones urbaines d'Europe ont accès à de nombreuses ressources de chaleur excédentaire. Environ 2 860 TWh/an de chaleur résiduelle sont accessibles dans l'UE, dont une grande partie pourrait être réutilisée.<sup>106</sup> Pour mettre ce chiffre en perspective, cela correspond presque à la demande énergétique totale de l'UE pour le chauffage et l'eau chaude dans les bâtiments résidentiels et tertiaires, soit environ 3 180 TWh par an dans l'UE27 et au Royaume-Uni.<sup>107</sup>

Dans certains pays, le potentiel de la chaleur excédentaire correspond même à la demande totale en chaleur.<sup>108</sup> Par exemple, aux Pays-Bas, la chaleur excédentaire s'élève à 156 TWh par an<sup>109</sup>, tandis que les besoins en chauffage pour l'eau et les espaces ne sont que de 152 TWh par an.<sup>110</sup> Il en va de même ou presque dans le reste du monde. Par exemple, la chaleur excédentaire du secteur industriel au nord de la Chine est d'environ 813 TWh, juste pour la période de chauffage.<sup>111</sup> Imaginez à combien s'élève la quantité totale de chaleur excédentaire de tous les secteurs en Chine !

## Cas : chaleur excédentaire provenant de la production d'hydrogène



La chaleur excédentaire de l'hydrogène produit par électrolyse peut être captée et utilisée pour chauffer les maisons et fournir de la chaleur aux industries. La production d'hydrogène à faibles émissions sera massive d'ici 2050 – l'AIE estime que la demande mondiale d'électricité pour l'électrolyse est de 14 800 TWh.<sup>112</sup> Environ **les deux tiers de l'électricité sont convertis en hydrogène et le reste est perdue sous forme de chaleur. Environ 17 % de cette perte d'énergie peut théoriquement être récupérée et transformée en énergie collective en 2030**, ce qui permettra aux villes d'alléger la charge des énergies renouvelables pour la production de chaleur.<sup>113</sup>

La figure 8 présente les sources de la demande mondiale d'électricité dans les Perspectives énergétiques de Bloomberg. Il est évident que la demande en électricité pour la production d'hydrogène sera énorme. Pour cette raison, nous devons nous assurer d'utiliser autant de chaleur résiduelle que possible issue du processus d'électrolyse. Cependant, ce potentiel thermique ne peut être utilisé que si nous planifions judicieusement notre production d'hydrogène, en construisant des usines d'électrolyse à proximité des systèmes d'énergie collective prévus ou existants. En effet, cela peut déjà être fait aujourd'hui. Plusieurs projets sont déjà en cours et permettront bientôt de distribuer la chaleur excédentaire des usines d'électrolyse par l'intermédiaire de systèmes d'énergie collective pour chauffer les maisons.<sup>114, 115</sup> Plusieurs facteurs influencent la quantité de chaleur excédentaire qui peut réellement être réalisée.

Par exemple, l'utilisation du plein potentiel nécessiterait une grande production d'énergie collective, et la production d'hydrogène doit avoir lieu à proximité d'un système d'énergie collective. De plus, de nombreuses régions ont peu ou pas de demande en chaleur. Cependant, les potentiels théoriques de récupération de la chaleur excédentaire de l'électrolyse sont si énormes que nous devons simplement en tenir compte lors de la planification des futures infrastructures énergétiques.

À l'échelle mondiale, nous pouvons théoriquement récupérer 1 228 TWh de chaleur à partir de l'électrolyse de l'hydrogène en 2050 et la redistribuer sous forme de chaleur collective si les installations de production d'hydrogène sont situées à proximité d'un système d'énergie collective approprié. **Pour mettre ce chiffre en perspective, 1 228 TWh de chaleur équivaut à près des deux tiers de la production mondiale actuelle de chaleur à partir du charbon, la plus grande source de chaleur.**<sup>116</sup> Rien que dans l'UE, environ 83 TWh peuvent être récupérés d'ici 2030, suffisamment pour couvrir plus de 1,5 fois le chauffage domestique actuel de l'Allemagne.<sup>117</sup> En Chine, 296-427 TWh peuvent être récupérés en 2060, entre 18 % et 26 % de la production de la chaleur actuelle du pays<sup>118</sup>. Bien sûr, il s'agit de potentiels théoriques, mais ils démontrent que si l'énergie collective et la chaleur excédentaire sont pris en compte dans la planification à long terme du système énergétique, ils peuvent contribuer de manière essentielle à l'objectif de 1,5 °C.

## Demande en électricité provenant de la production d'hydrogène

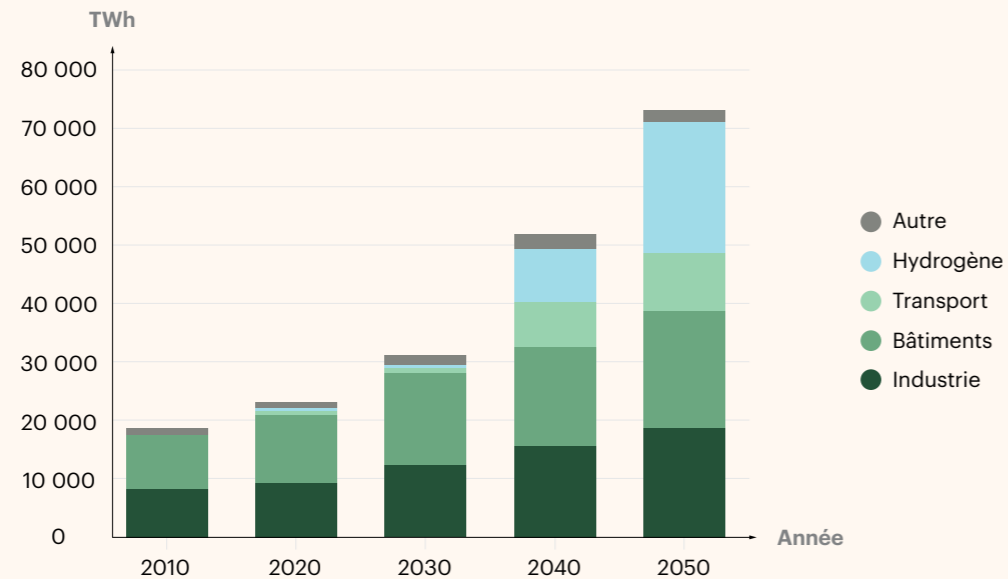


Figure 8 : sources de la demande mondiale en électricité dans le scénario Net Zero de Bloomberg NEF<sup>119</sup>

## Faire le lien entre les consommateurs et les producteurs d'énergie

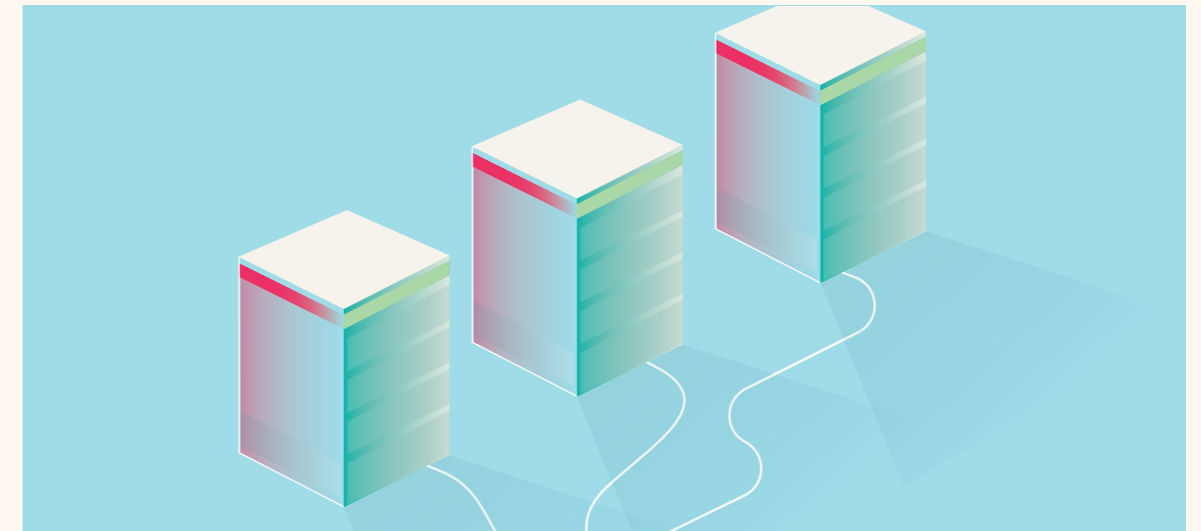
Les producteurs de chaleur peuvent réutiliser la chaleur qu'ils produisent dans le cadre de leurs propres processus internes pour augmenter la performance. Par exemple, la chaleur excédentaire se trouve souvent dans les processus de fabrication ou dans les processus de chauffage, de refroidissement, de congélation et de combustion. La manière la plus simple d'utiliser la chaleur excédentaire est de réintégrer la chaleur dans les mêmes processus. Par exemple, dans les supermarchés, la chaleur excédentaire produite par les congélateurs et les réfrigérateurs peut être utilisée pour fournir de l'eau chaude ou pour chauffer le supermarché lui-même. L'une des principales façons d'utiliser la chaleur résiduelle en interne est d'installer une unité de récupération de chaleur. Une unité de récupération de chaleur vaut la peine d'être envisagée dans presque tous les cas où l'énergie thermique inutilisée est produite en tant que « produit résiduel ».

Dans les villes, l'intégration sectorielle peut se produire à petite échelle par le biais de l'urbanisme ou à plus grande échelle par le biais des réseaux d'énergie collective. L'urbanisme peut tirer parti du potentiel de l'intégration sectorielle et de la chaleur excédentaire en reliant les producteurs d'énergie aux consommateurs d'énergie par le biais d'un réseau intelligent. De grandes synergies peuvent se produire lorsqu'un producteur de chaleur excédentaire, par exemple un centre de données, est situé

à proximité d'entités qui peuvent acheter et utiliser de grandes quantités de chaleur excédentaire (par exemple, l'horticulture). L'étude des possibilités de telles synergies entre les producteurs d'énergie et les utilisateurs dans l'urbanisme s'appelle la planification des grappes industrielles et contribue à la décarbonation de notre système énergétique. En outre, la collaboration entre les entreprises voisines a montré qu'elle apportait des avantages économiques à la fois à l'acheteur et au vendeur.

Dans de nombreuses parties du monde, les systèmes d'énergie collective alimentent les maisons et les entreprises en chauffage et en refroidissement. Le réseau de chauffage collectif exploite la chaleur provenant d'une combinaison de sources, telles que les ressources renouvelables (solaire, géothermique et biomasse) et les ressources fossiles, telles que les centrales électriques, et la distribue par le biais de conduites aux utilisateurs finaux sous forme d'eau chauffée. Aujourd'hui, la majorité de la production mondiale de la chaleur collective repose sur des combustibles fossiles. Toutefois, **l'un des principaux points forts des systèmes d'énergie collective est leur capacité à intégrer différentes sources de chaleur qui peuvent remplacer les combustibles fossiles pour le chauffage et le refroidissement.** Avec l'évolution de la technologie de l'énergie collective, de plus en plus de sources de chaleur écologiques peuvent être intégrées dans le système. Aujourd'hui, le système de chauffage collectif dit de 4e génération permet d'intégrer des sources de chaleur à très basse température dans le système d'énergie collective et de fournir du chauffage pour les nouveaux bâtiments qui peuvent fonctionner à basse température.

## Cas : le potentiel de la chaleur excédentaire des centres de données



Les données sont au cœur de l'économie numérique mondiale d'aujourd'hui. Elles sont le pilier du flux d'informations et alimentent un éventail d'activités allant des infrastructures et des transports à la vente au détail et à la fabrication. Selon l'AIE, en 2021, les centres de données ont consommé 220-320 TWh d'électricité, ce qui représente environ 0,9-1,3 % de la demande mondiale finale en électricité<sup>120</sup>, soit autant que la consommation électrique de l'Australie ou de l'Espagne.<sup>121</sup>

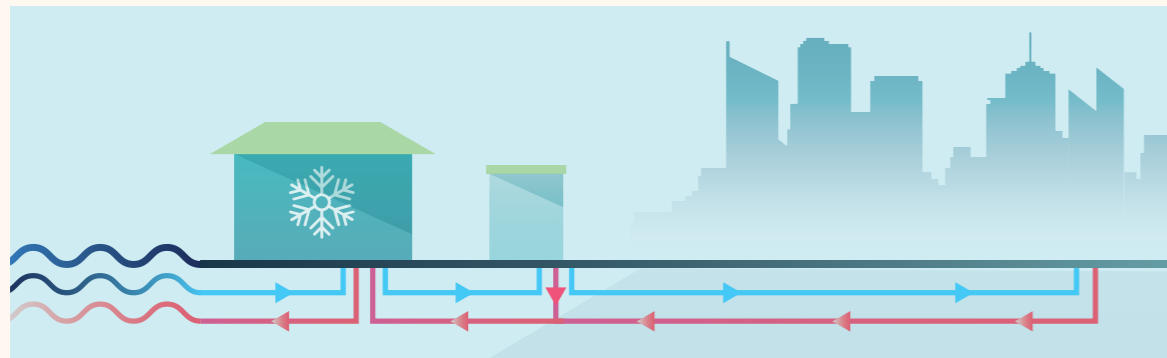
Les centres de données sont également des producteurs importants de chaleur excédentaire. Les serveurs d'un centre de données génèrent de la chaleur équivalente à leur consommation d'électricité, et le refroidissement nécessaire de ces machines produit également beaucoup de chaleur excédentaire. Par rapport à d'autres sources de chaleur excédentaire, **celle des centres de données est ininterrompue et constitue donc une source d'énergie propre très fiable.** Il existe de nombreux exemples où la chaleur excédentaire des centres de données peut être réutilisée pour chauffer des bâtiments voisins par le biais d'un micro-réseau.

Elle peut également être exportée vers le réseau d'énergie collective et utilisée à de multiples fins.

Dans la ville de Francfort-sur-le-Main, plusieurs projets sont en cours afin d'aider la ville à extraire la chaleur excédentaire issue des centres de données et à l'utiliser pour répondre à l'ensemble de sa demande en chaleur des foyers et bureaux privés. D'un point de vue mathématique, il a été estimé que la chaleur résiduelle des centres de données de Francfort pourrait, d'ici 2030, couvrir l'ensemble de la demande en chaleur des foyers privés et des immeubles de bureaux dans la ville.<sup>122</sup>

À Dublin, Amazon Web Services a construit la première solution durable sur mesure en Irlande pour fournir de la chaleur à faible émission de carbone à une banlieue de Dublin en pleine croissance. Le centre de données récemment achevé fournira dans un premier temps de la chaleur à 47 000 m<sup>2</sup> de bâtiments du secteur public. Il fournira également de la chaleur pour 3 000 m<sup>2</sup> d'espace commercial et 135 appartements à loyer modéré.<sup>123</sup>

## Cas : les systèmes de refroidissement collectif consomment deux fois moins d'énergie que les climatiseurs



Dans un système de refroidissement collectif, l'eau refroidie est fournie aux bâtiments commerciaux et résidentiels par le biais de conduites provenant d'une centrale de refroidissement. L'eau froide pour le refroidissement collectif est fournie par des ressources d'eau froide naturelles et gratuites comme la mer, les lacs, les rivières ou les réservoirs souterrains, ou est produite à partir de la chaleur résiduelle de la production d'énergie ou des industries, ou via des refroidisseurs électriques centraux. L'eau froide du système de refroidissement collectif peut être produite la nuit et distribuée aux heures pleines le jour. Cela réduit le besoin en refroidisseurs pendant les heures pleines et réduit les coûts d'exploitation, car l'électricité est moins chère et les températures ambiantes sont plus basses la nuit.

Environ 10 % de la demande mondiale en électricité provient du refroidissement des espaces et l'AIE estime que d'ici 2050, environ deux tiers des foyers du monde pourraient disposer d'un climatiseur.<sup>124</sup> Selon des études internationales, la demande en refroidissement des bâtiments commerciaux et résidentiels augmentera de manière exponentielle dans les années à venir, en particulier dans les pays à revenu élevé et les économies émergentes

en Inde, en Chine et en Indonésie.<sup>125</sup> Cependant, les systèmes de refroidissement collectif consomment deux fois moins d'énergie que les climatiseurs et réduiront également la consommation de gaz fluorés nocifs pour l'environnement.<sup>126</sup>

Les systèmes de refroidissement collectif existants dans des villes telles que Paris, Dubaï, Helsinki, Copenhague et Port Louis ont prouvé que le refroidissement collectif peut être au moins deux fois plus efficace que les systèmes décentralisés traditionnels.<sup>127</sup> À Dubaï, par exemple, 70 % de l'électricité est consommée par des climatiseurs, et pour répondre à la demande en refroidissement, la ville a développé l'un des plus grands réseaux de refroidissement collectif au monde. D'ici 2030, 40 % de la demande en refroidissement de la ville sera satisfaite par le refroidissement collectif.<sup>128</sup> Et **dans les cas où l'eau des lacs ou de l'océan peut être utilisée, également appelée « refroidissement libre », la demande en énergie peut même être réduite jusqu'à 90 % par rapport aux opérations de refroidissement conventionnelles.**<sup>129</sup> Un exemple de ce type de système se trouve à Toronto, au Canada, où l'eau du fond du lac Ontario est utilisée pour une alimentation en refroidissement collectif à grande échelle.<sup>130</sup>

# Intégrer les secteurs

## 1 Une grande partie de l'énergie mondiale est perdue sous forme de chaleur excédentaire

D'ici 2030, jusqu'à 53 % de l'apport énergétique mondial sera perdu sous forme de chaleur excédentaire. Cependant, le climat peut grandement être avantage si nous redoublons d'efforts pour récupérer cette chaleur excédentaire. En effet, **la récupération du plein potentiel théorique de chaleur excédentaire peut réduire les émissions mondiales de 10 à 19 %.**

## 2 Faire le lien entre les producteurs et les consommateurs d'énergie

En capturant la chaleur excédentaire et en le redistribuant par le biais de l'urbanisme intelligent et de systèmes d'énergie collective, **les gros consommateurs d'énergie tels que les centres de données, les supermarchés, la production d'hydrogène et les installations de traitement des eaux usées peuvent devenir d'importants fournisseurs d'énergie.**

## 3 L'augmentation de la production d'hydrogène crée un potentiel de chaleur excédentaire important

D'ici 2050, l'AIE estime que la demande mondiale d'électricité pour l'électrolyse sera de 14 800 TWh. Si nous n'agissons pas, environ un tiers de cette électricité sera perdue sous forme de chaleur excédentaire. Cependant, **à l'échelle mondiale, nous pouvons théoriquement récupérer 1 228 TWh de chaleur en 2050 en chaleur collective**, ce qui équivaut à près des deux tiers de la production mondiale actuelle de chaleur à partir du charbon.

# Politique

# Recommandations

Le moment est venu pour les décideurs à tous les niveaux d'établir le cadre réglementaire et économique adéquat pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. La performance énergétique 2.0 a le potentiel non seulement de réduire les émissions de carbone, mais aussi de réaliser des économies substantielles tant au niveau sociétal que du client. Mais pour que cela devienne une réalité, le cadre réglementaire doit être mis en œuvre dès maintenant.

Ces recommandations politiques sont des mesures nécessaires à prendre pour s'assurer que les solutions pour notre futur système énergétique sont non seulement conçues, mais aussi mises en œuvre.



## Inclure des solutions de flexibilité dans la politique énergétique à tous les niveaux pour médiatiser la relation entre l'offre et la demande en énergie renouvelable et d'assurer la sécurité énergétique.

Le nouveau réseau intelligent doit inclure des technologies de transfert de charge et d'écrêtage. Introduire des lignes directrices sur la flexibilité du côté de la demande (DSF) dans les réglementations de la construction et de l'industrie, afin de guider les consommateurs pour mettre en œuvre des solutions de flexibilité plus rapidement. Permettre aux consommateurs et aux producteurs d'accéder aux données de consommation, ce qui facilite la participation active et les possibilités pour les gestionnaires de réseau d'intégrer davantage les solutions de flexibilité du côté de la demande. Mettre en place des mécanismes de tarification pour encourager la consommation d'énergie en dehors des heures pleines.

- **Dans les bâtiments et les industries**, mettre en œuvre des réglementations de flexibilité locales, nationales et internationales, afin de guider les consommateurs d'électricité pour qu'ils mettent en œuvre des solutions de flexibilité plus rapidement. Offrir aux consommateurs des incitations économiques pour accroître activement la flexibilité en proposant l'installation de compteurs intelligents par le biais de subventions gouvernementales ou de réglementations en matière de construction. Permettre aux opérateurs de système d'accéder aux données de consommation d'électricité des bâtiments, de l'industrie et des ménages.
- **Sur le marché de l'énergie**, mettre en œuvre des normes de flexibilité du marché pour assurer une intégration facile des nouveaux appareils et des sources d'énergie renouvelables locales, ce qui conduira à un marché concurrentiel pour les fabricants, les gestionnaires de système et les entreprises de services publics. Par exemple, la norme S2 de l'UE permet la communication et l'interopérabilité entre les appareils tout en récupérant les informations du réseau pour coordonner la consommation d'énergie et la synchroniser avec la production, garantissant ainsi une mise en œuvre efficace des solutions DSF.



## Économiser de l'énergie et électrifier tout dans les transports, les industries et les bâtiments.

L'augmentation de l'efficacité dans tous les secteurs, parallèlement à une refonte électrique complète de nos infrastructures, est la première étape cruciale à franchir. La réduction de la perte énergétique dans tous les secteurs commence par la cartographie de l'utilisation de l'énergie afin d'identifier les domaines d'amélioration. Donner un mandat de planification énergétique, définir des objectifs et des plans ambitieux et réalisables à court, moyen et long terme, ainsi que mettre en œuvre un cadre réglementaire approprié pour inciter les investissements.

- **Dans les bâtiments**, concevoir et mettre en œuvre des codes énergétiques obligatoires pour accélérer la transition vers des bâtiments prêts pour la neutralité carbone. Mettre en place des stratégies de rénovation à long terme, y compris une réglementation et des incitations appropriées pour stimuler la rénovation, utiliser les énergies renouvelables et augmenter les taux de rénovation des bâtiments existants. Encourager le remplacement des systèmes techniques de construction fonctionnant à l'aide de combustibles fossiles pour le chauffage des espaces, l'eau chaude sanitaire et le refroidissement par ceux utilisant des énergies renouvelables, telles que les pompes à chaleur ou les réseaux d'énergie urbaine.
- **Dans les industries**, établir des normes minimales de performance énergétique pour les équipements clés, tels que les moteurs et les pompes, qui peuvent augmenter les niveaux d'efficacité industrielle. Veiller à ce que les impôts et la politique fiscale incitent les industries à devenir plus écoénergétiques, par exemple en utilisant des politiques de la carotte et du bâton qui encouragent l'action par le biais de la tarification du carbone. Lancer des programmes qui permettent aux PME d'avoir une vue d'ensemble et de créer un plan de décarbonation. Élaborer des programmes qui intègrent des audits énergétiques à des instructions sur la façon de transmettre efficacement les initiatives vertes. Invoquer des mesures d'efficacité obligatoires à court terme identifiées dans le cadre d'audits énergétiques.
- **Dans le domaine des transports**, augmenter l'efficacité et électrifier grâce à des investissements, à la réglementation et à des incitations. Créer un marché pour les technologies d'électrification complète en fixant des normes d'intensité carbone élevées pour les nouvelles machines et les nouveaux véhicules. Structurer la fiscalité des véhicules pour encourager l'achat de véhicules performants et planifier le stationnement des véhicules électriques et les bornes de recharge. Inclure le processus de construction dans les évaluations du cycle de vie des bornes de recharge. Offrir des incitations pour moderniser les moteurs diesel existants à longue durée de vie afin d'améliorer la performance énergétique. Utiliser la réglementation locale et les options de permis pour créer des zones et des chantiers de construction à émissions faibles ou nulles. Électrifier le trafic de fret et de livraison de marchandises du dernier kilomètre dans les centres-villes. Construire une infrastructure de recharge et s'assurer que les incitations financières donnent la priorité à la recharge intelligente pour tirer pleinement parti de la numérisation et permettre aux véhicules électriques de contribuer à résoudre les problèmes de flexibilité et de stockage.



### Investir dans la mise à niveau du réseau énergétique pour tenir compte de l'augmentation de l'énergie renouvelable dans le système.

Des investissements dans le réseau sont nécessaires pour répondre à l'augmentation de la demande en électricité et à l'augmentation de l'offre en énergie renouvelable. Pour se remettre sur la bonne voie pour atteindre le scénario de neutralité carbone d'ici 2050, les investissements dans le futur système énergétique doivent doubler d'ici 2030.<sup>131</sup> De tels investissements réduiront les coûts sociétaux et réduiront à la fois les coûts énergétiques et les factures d'énergie des consommateurs. Plusieurs initiatives pourraient être mises en œuvre pour contrer l'infrastructure vieillissante du réseau et faire face à l'expansion urgente. La plupart des réseaux de distribution d'électricité sont situés autour de centrales électriques centralisées et doivent être mis à niveau pour distribuer l'électricité du parc de panneaux solaires et des parcs éoliens locaux. Mettre en œuvre une approche de « guichet unique », où les investisseurs dans les énergies renouvelables n'ont qu'à envoyer la demande de projet à une seule entité, qui coordonne ensuite tous les processus d'autorisation avec les autorités compétentes.

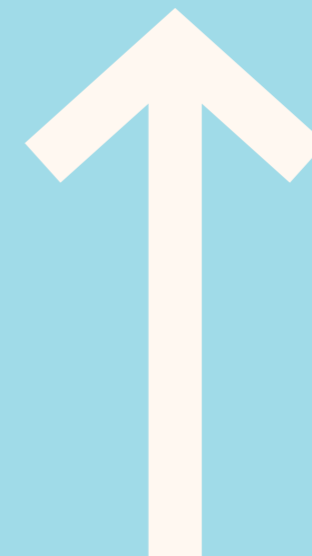
- **Dans la planification du réseau**, la priorité devrait être donnée à l'adoption de sources d'énergies renouvelables provenant d'applications telles que les éoliennes, le photovoltaïque et d'autres projets d'infrastructure à plus long terme qui devraient être lancés dans les décennies à venir. Les fonds publics alloués à l'innovation et à la recherche devraient être axés sur l'intégration efficace des technologies d'énergie renouvelable. Cela pourrait impliquer la mise au point de nouveaux produits et procédés, la mise à l'essai et la démonstration de nouvelles applications et de nouveaux modèles, ainsi qu'une collaboration étroite avec le milieu universitaire, l'industrie et la société civile.
- **Lors de la transition vers le futur réseau énergétique**, fournir des conditions-cadres juridiques permettant une mise en œuvre rapide et efficace des technologies de réseau intelligent telles que les compteurs intelligents, les capteurs, les onduleurs, les commutateurs et les logiciels. Améliorer la coordination et la coopération régionales pour assurer l'adoption des énergies renouvelables dans le réseau. Accroître le partage de l'information, des ressources et des services, ainsi que l'harmonisation des politiques et des réglementations. En fixant des prix, des règles et des normes pour l'énergie et les services auxiliaires, une meilleure conception du marché contribuerait à encourager et à ajouter des mécanismes pour une répartition efficace et équitable des coûts et des avantages de l'intégration des énergies renouvelables.
- **Pour sécuriser l'approvisionnement en énergie**, investir dans des installations de conversion et de stockage de l'électricité afin de réaliser le plein potentiel et la disponibilité des énergies renouvelables sur le réseau. Les installations d'électrolyse de l'hydrogène joueront un rôle essentiel à la fois dans le stockage et la conversion. Cependant, son utilisation doit être optimisée grâce à une planification minutieuse. Réglementer ces installations et veiller à ce que des normes d'efficacité élevées soient respectées pour réduire la consommation d'énergie et planifier l'intégration de la chaleur excédentaire des installations d'électrolyse.



### Investir dans l'intégration sectorielle.

Un certain nombre d'obstacles empêchent les acteurs du marché d'exploiter le potentiel de réutilisation de la chaleur excédentaire. Éliminer ces obstacles, par exemple en favorisant un traitement équitable de la chaleur résiduelle et des sources d'énergie renouvelables utilisées dans les réseaux de chaleur. Repenser les marchés de l'énergie pour permettre la participation des technologies d'intégration sectorielle à des marchés spécifiques et internaliser toutes les externalités positives des technologies à faible émission de carbone.

- **Dans les gouvernements nationaux**, fixer des objectifs pour atteindre un certain seuil d'intégration sectorielle. Fixer un objectif de réaffectation et d'utilisation de l'énergie résiduelle comme ligne directrice pour le marché de l'énergie et encourager une approche holistique de l'intégration sectorielle. Éliminer les obstacles administratifs pour inciter les utilisateurs à se connecter aux réseaux de chauffage collectif et encourager ainsi également les services publics de chauffage collectif à améliorer leurs performances.
- **Dans le cadre de la planification urbaine et rurale**, mettre en œuvre une planification énergétique obligatoire pour permettre l'évaluation du potentiel énergétique résiduel et utiliser au mieux les ressources disponibles localement. La planification du réseau en tant qu'outil devrait être guidée par le principe de « la performance énergétique d'abord », ce qui réduirait le besoin de nouveaux investissements dans le réseau, tant au niveau national qu'international. Promouvoir une plus grande utilisation de l'énergie excédentaire en obligeant les entités à planifier l'utilisation de la chaleur excédentaire. La planification de la chaleur doit être détaillée et inclure les sources potentielles futures de chaleur excédentaire, telles que les installations d'électrolyse. La planification énergétique peut révéler à la fois un potentiel à petite échelle ou un potentiel d'opportunités à plus grande échelle, telles que le déploiement du chauffage collectif.
- **Sur le marché de l'énergie**, abaisser la taille minimale de l'offre pour permettre aux petits acteurs d'offrir leurs services énergétiques au réseau énergétique, créant ainsi des marchés locaux de flexibilité pour résoudre les problèmes de réseau local. Encourager l'intégration du secteur par le biais de la législation fiscale en faveur de l'utilisation de la chaleur excédentaire et veiller à ce que des structures tarifaires de réseau appropriées soient prises en compte.



# Références

1. IEA (2022). World Energy Outlook. Table A.1.c: World energy supply. [list grouping here]
2. Eyre, N. (2021). From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency. 14:77, 1-20.
3. Firth, A., et al. (2019). Quantification of global waste heat and its environmental effects, Applied Energy, Volume 235, p. 1325.
4. Bakke, G. (2016). The Grid. Bloomsbury USA. P. xii.
5. Clarke, A.C. (1962). Hazards of Prophecy: The Failure of Imagination. Profiles of the Future.
6. Eyre, N. (2021). From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency. 14:77, 1-20.
7. IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136. (Assuming the energy content of hydrogen to be 33.33 kWh/kg)
8. IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136.
9. IRENA (n.d.). Policies for green hydrogen.
10. BloombergNEF (2022). New Energy Outlook.
11. Firth, A., et al. (2019). Quantification of global waste heat and its environmental effects, Applied Energy, Volume 235, p. 1325.
12. Birol, F. in Sheppard, D. (2023). “World at ‘beginning of end’ of fossil fuel era, says global energy watchdog”. Financial Times.
13. IEA (2022). World Energy Outlook. Table A.1.c: World energy supply, Table A.1.a: World energy supply, Table A.1.b: World energy supply.
14. IRENA (2022). Renewable Power Generation Costs in 2022.
15. Eyre, N. (2021). From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency. 14:77, 1-20.
16. IEA (2022). World Energy Outlook 2022 Free Dataset. Global data. Grouping of IEA PRODUCT lvl 2: Bioenergy covers ‘Modern bioenergy: solid’, ‘Modern bioenergy: liquid’, and ‘Modern bioenergy: gas’. Abated fossil energy covers ‘Natural gas: with CCUS’ and ‘Coal: with CCUS’. Unabated fossil energy covers ‘Natural gas: unabated’, ‘Oil’, and ‘Coal: unabated’.
17. IEA. (2021). Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. Table 2.5. p. 72.
18. Eyre, N. (2021). From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency. 14:77, 1-20.
19. Eyre, N. (2021). From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency. 14:77, 1-20.
20. NAE Website - Great Achievements and Grand Challenges
21. Danfoss (2023). FPC2023 Danfoss, p. 12.
22. IDTechEx (2022). Electric Construction Machines Vital for Greener Construction
23. JRC (2022). CO2 emissions of all world countries.
24. KOMATSU (2010). Introduction of Komatsu genuine hydraulic oil KOMHYDRO HE.
25. Construction Europe (2023). Danfoss Q&A: Technology to reduce excavator energy consumption.
26. Construction Europe (2023). Danfoss Q&A: Technology to reduce excavator energy consumption.
27. Construction Europe (2023). Danfoss Q&A: Technology to reduce excavator energy consumption.
28. IEA (2023). Tracking Heating.
29. IEA (2022). The Future of Heat Pumps: World Energy Outlook Special Report, p. 11.
30. IEA (n.d.). How a heat pump works.
31. IEA (2023). Heating. Home heating technologies.
32. IEA (2023). Heating. Home heating technologies.
33. IEA (2023). Electric Vehicles.
34. IEA (2023). Electric Vehicles.
35. U.S. Department of Energy – Where the Energy Goes: Electric Cars.
36. IDTechEx (2023). Power Electronics for Electric Vehicles 2023-2033 (Sample pages) p. 6.
37. Power Electronics Europe (2018). Issue 3 p 22-25. SiC-Based Power Modules Cut Costs for Battery-Powered Vehicles.
38. Power Electronic News (2022). The Role of SiC in E-Mobility.
39. Danfoss calculations.
40. Penny, V. (2021). Electric Cars Are Better for then Planet – and Often Your Budget, Too. New York Times.
41. Buitendach et al. (2021). Effect of a ripple current on the efficiency of a PEM electrolyser. Results in Engineering. 10. 1-13.
42. Sepulveda, N.A. et al. (2021). The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems. Nature Energy. 6. p. 506-516.
43. Eyre, N. (2021). From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency. 14:77, 1-20.
44. Rosenow, J. & Eyre, N. (2022). Reinventing energy efficiency for net zero. Energy Research & Social Science. 90. 1-5.
45. Eyre, N. (2021). From using heat to using work: reconceptualising the zero carbon energy transition. Energy Efficiency. 14:77, 1-20.
46. Rosenow, J. & Eyre, N. (2022). Reinventing energy efficiency for net zero. Energy Research & Social Science. 90, p. 3.
47. Langevin et al. (2023). Demand-side solutions in the US building sector could achieve deep emissions reductions and avoid over \$100 billion in power sector costs. One Earth. 6(8). 1005-1031.
48. Danfoss. Leanheat – for building owners
49. Danfoss. Leanheat – for building owners
50. European Commission (2020). Directorate-General for Energy. Küpper, G., Hadush, S., Jakeman, A. et al. Regulatory priorities for enabling demand side flexibility. Publications Office. p. 6. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/410530>
51. Ea Energy Analyses (2023). Value of Demand Flexibility in the European Power Sector.
52. The EU produced 2641 TWh of electricity in 2022, of which 19.6% or 517 TWh stemmed from natural gas. (EU (2023). Infographic - How is EU electricity produced and sold?.)
53. JRC (2023). Consumption Footprint Platform | EPLCA.
54. Reuters (2023). Europe's spend on energy crisis nears 800 billion euros.
55. IEA (2023). Tracking grid-scale storage.
56. JRC (n.d.). RMIS – Raw Materials Information System: Battery supply chain challenges.
57. Clean Energy Wire (2021). More renewables curbed to stabilise German power Grid – report.
58. IEA (2023). Energy Efficiency: The Decade for Action, p. 13.
59. Wärtsilä (2018). Blackout economics.
60. Shuai, M. et al. (2018). Review on Economic Loss Assessment of Power Outages. Procedia Computer Science. Vol. 130. pp. 1158-1163.
61. Macmillan, M. et al. (2023). Shedding light on the economic costs of long-duration power outages. Energy Research & Social Science. Vol. 99. 103055.
62. Environmental Investigation Agency and Shecco (2018). Technical report on energy efficiency in HFC-free supermarket refrigeration, p. 10.
63. Danfoss (2023). Building better supermarkets for the world.
64. Clean Energy Wire (2021). More renewables curbed to stabilise German power Grid – report.
65. IEA (2023). Energy Efficiency: The Decade for Action, p. 13.
66. IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136.
67. IRENA (n.d.). Policies for green hydrogen.
68. BloombergNEF (2022). New Energy Outlook.
69. Deloitte (2023). Green hydrogen: Energizing the path to net zero. p. 13.
70. IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136. (Assuming the energy content of hydrogen to be 33.33 kWh/kg)
71. IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136.
72. IRENA (n.d.). Policies for green hydrogen.
73. BloombergNEF (2022). New Energy Outlook.
74. Deloitte (2023). Green hydrogen: Energizing the path to net zero. p. 13.
75. In 2030 we will need 90 Mt (10.79 EJ/9 million kg) hydrogen (IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136.). The lowest price is USD 1.3 to 3.5/kg hydrogen (IEA (2021). Global Hydrogen Review: Executive Summary.). 90 billion kg hydrogen X USD 1.3 to 3.5/kg hydrogen = USD 117-315 billion investments needed.
76. European Commission (n.d.). Hydrogen. Assuming a lower heating value of hydrogen of 33.3 kWh/kg.
77. In 2017, the US nuclear power plant R.S. Ginna (American Geosciences Institute (n.d.). How much electricity does a typical nuclear power plant generate?) produced 4,697,675 MWh or 4,697 TWh electricity. EU will plans to produce and import a total of 666 TWh hydrogen. 666 TWh/4.697 TWh = 142 nuclear plants like R.S. Ginna.
78. Agora Energiewende (2023). Breaking free from fossil gas: A new path to a climate-neutral Europe, p. 11.
79. Global Wind Energy Council (2023). Global Offshore Wind Report 2023. p. 2.
80. Hydrogen Science Coalition (2022). Hydrogen for heating? A comparison with heat pumps (Part 1).
81. Hydrogen Science Coalition (2022). Hydrogen for heating? A comparison with heat pumps (Part 1).
82. Danfoss estimates based on Buitendach et al. (2021). Effect of a ripple current on the efficiency of a PEM electrolyser. Results in Engineering, 10, p. 1-13.
83. London’s annual electricity consumption in buildings and transport in 2018 was 37.82 TWh (Mayor of London (2022). London annual energy usage.) and we will need 14 800 TWh of electricity for hydrogen production in 2050 (IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136.). 1 % of 14 800 TWh is 148 TWh. 148 TWh/37.82 TWh = 3.8, almost four times London's electricity consumption in 2018.
84. IEA (2021). How rapidly will the global electricity storage market grow by 2026?.
85. PNNL (2021). Energy Storage Cost and Performance Database.
86. IEA (2023). Grid-scale Storage.
87. Danfoss (n.d.). Thermal energy storage.
88. J. Andersson et al. (2019). Large-scale storage of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 44. Issue 23. p. 11901-11919.
89. CLOUGLOBAL (2023). Pros and Cons of Hydrogen Energy Storage: Is Worth the Investment?.
90. Energinet (2023). Hydrogen Market Assesment Report for Denmark and Germany. p. 12.
91. Sepulveda, N.A. et al. (2021). The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems. Nature Energy. 6. p. 506-516.
92. Deloitte (2023). Green hydrogen: Energizing the path to net zero. p. 16.
93. Choudhury, S. (2021). Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects. Int Trans Electr Energy Syst. 2021; 31(9).
94. Deloitte (2023). Green hydrogen: Energizing the path to net zero. p. 16.
95. EESI (2019). Energy Storage 2019.
96. IEA (2023). Grid-scale Storage.
97. PNNL (2021). Energy Storage Cost and Performance Database.
98. Blakers, A. et al. (2021). A review of pumped hydro energy storage, Progress in Energy, Volume 3, Number 2.
99. Conolly D. & Maclaughlin S. (2011). Locating Sites for Pumped Hydroelectric Energy Storage. In Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy Storage.
100. Anna Normyle & Jamie Pittock (2020) A review of the impacts of pumped hydro energy storage construction on subalpine and alpine biodiversity: lessons for the Snowy Mountains pumped hydro expansion project, Australian Geographer, 51:1, 53-68, DOI: 10.1080/00049182.2019.1684625
101. IEA (2023). Grid-scale Storage.
102. IEA (2023). Grid-scale Storage.
103. Firth, A., et al. (2019). Quantification of global waste heat and its environmental effects, Applied Energy, Volume 235, p. 1325.
104. Firth, A., et al. (2019). Quantification of global waste heat and its environmental effects, Applied Energy, Volume 235, p. 1330.
105. Euroheat & Power (2023). DHC Market Outlook, p. 3
106. Connolly, D., et al. (2013). Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27. Department of Development and Planning, Aalborg University, p. 54
107. Connolly, D., et al. (2013). Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27. Department of Development and Planning, Aalborg University



108. Heat demanded by residential and service sector buildings, also called “low-temperature heat demand”, according to 2015 data from the Heat Roadmap Europe 4. This demand doesn’t cover industrial heat demand as required input temperatures are too high for excess heat recovery technologies.
109. <https://heatroadmap.eu/peta4/>
110. Heat Roadmaps – Heat Roadmap Europe
111. Luo, A., Fang, H., Xia, J., & Lin, B. (2017). Mapping potentials of low-grade industrial waste heat in Northern China. Resources, Conservation and Recycling, 125, 335-348
112. IEA (2022). World Energy Outlook, p. 136.
113. Danish Energy Agency (2017). Technology Data – Renewable Fuels. p. 128.
114. TVIS (2022). Fjernvarme til 1300 husstande mere fra Danmarks første PtX-aftale.
115. COWI (2023). Kassø PTX (E-methanol) - Miljøkonsekvensrapport. p. 24
116. The global recoverable excess heat from electrolysis is 1.228 TWh in 2050 (8.3% of 14.800 TWh) or 4.420.800 TJ. The global heat generation from coal in 2020 was 7.039.840 TJ (IEA (2022). Energy Statistics Data Browser, filter: Energy topic: Electricity and heat, Indicator: Heat generation by source, Country or region: World).
117. The European Union plans to produce 10 million tons of renewable hydrogen through electrolysis by 2030 (EU (2022). Energy – Hydrogen). Assuming 33.3 kWh/kg hydrogen, this is 333 TWh hydrogen. Roughly 2/3 of the electricity input for electrolysis is converted to hydrogen, and 1/3 is wasted as heat.  $333 \text{ TWh} / (2/3) = 499.5 \text{ TWh}$  electricity input. 16.6% of the electricity-input for electrolysis can be recovered to district heating in 2030 (Danish Energy Agency (2017). Technology Data – Renewable Fuels. p. 128.).  $499.5 \text{ TWh} \times 0.166 = 82.9 \text{ TWh}$  recoverable for district heating from electrolysis in EU in 2030. 51.5 TWh heat was distributed to private households and residential buildings in Germany in 2017 (Statistisches Bundesamt (2017). Balance sheet of heat supply, total).  $82.9 \text{ TWh} / 51.5 \text{ TWh} = 1.6$ , more than 1.5 times Germany’s domestic heating in 2017.
118. In 2060, China’s hydrogen production will be 90 to 130 million tons, of which 80% will be produced through electrolysis (IEA (2022). Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China: Executive summary). Assuming 33.3 kWh per kg hydrogen, the hydrogen produced from electrolysis will contain  $2.376\text{-}3.432 \times 10\text{-}12 \text{ kWh}$ , or  $2.376\text{-}3.432 \text{ TWh}$ . About 2/3 of the electricity input for electrolysis is converted to hydrogen and the rest is wasted as heat, so the electricity demand for electrolysis is  $2.376 \text{ to } 3.432 \text{ TWh} / (2/3) = 3.564\text{-}5.148 \text{ TWh}$ . 8.3% of the electricity input for electrolysis is recoverable excess heat in 2050 (Danish Energy Agency (2017). Technology Data – Renewable Fuels. p. 128.). Assuming this is representative for 2050, we can say:  $3.564 \text{ TWh} \times 0.083 = 296 \text{ TWh}$ , and  $5.148 \text{ TWh} \times 0.083 = 427 \text{ TWh}$ . China’s 2020 heat generation is 5.953.612 TJ, or 1.654 TWh (IEA (2022). Energy Statistics Data Browser., filter: Energy topic: Electricity and heat, Indicator: Heat generation by source, Country or region: People’s Republic of China).  $100 / 1.654 \text{ TWh} \times 296 \text{ TWh} = 17.9\%$ , and  $100 / 1.654 \text{ TWh} \times 427 \text{ TWh} = 25.8\%$ .
119. BloombergNEF (2022). New Energy Outlook 2022.
120. IEA (2022). Data Centres and Data Transmission Networks
121. Australia’s electricity consumption was 237 TWh and Spain’s was 234 TWh in 2021 (EIA (n.d.). International. Electricity Consumption.), well within the range of global electricity consumption from data centers in 2021 (220-320 TWh)
122. eco (2021). Data centres as Gamechangers for Urban Energy Supply: City of Frankfurt am Main Could Cover Most of its Heating Needs by 2030 with Waste Heat
123. DCD (2021). Heatworks breaks ground on AWS district heating scheme in Dublin, Ireland
124. IEA (2018). The Future of Cooling, p. 26 & 59
125. IEA (2018). The Future of Cooling, p. 11
126. Danfoss (2016). Making the case for district cooling, p. 3
127. Danfoss (2016). Making the case for district cooling, p. 3
128. MarkNtel (2023). UAE District Cooling Market Research Report: Forecast (2023-2028)
129. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2022). Guide for Resilient Energy Systems Design in Hot and Humid Climates.
130. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2022). Guide for Resilient Energy Systems Design in Hot and Humid Climates.
131. IEA (n.d.). Smart-grids.

# whyee.com

En savoir plus sur la manière dont les solutions de performance énergétique peuvent accélérer la transition écologique.