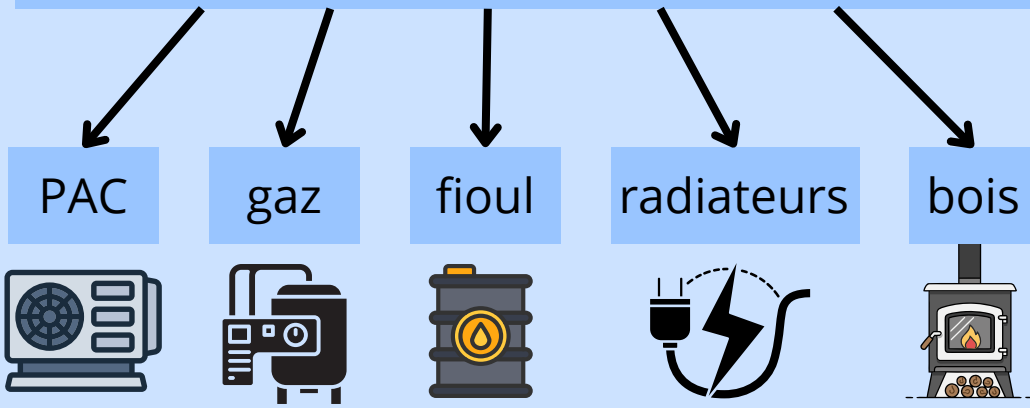
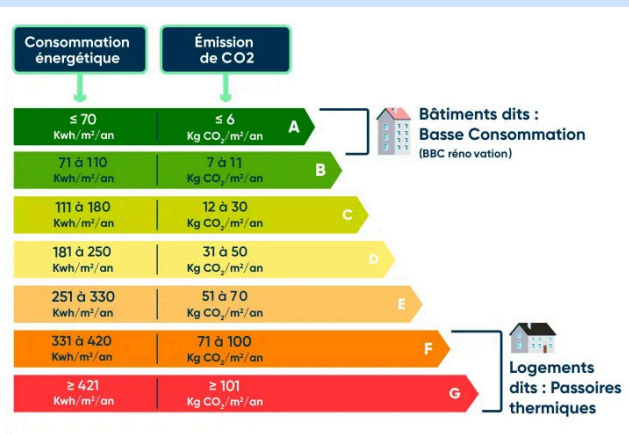


Chauffer et isoler une habitation



Ces différentes méthodes de chauffage n'ont pas le même impact environnemental et économique sur les foyers. L'efficacité énergétique d'un logement dépend aussi de l'isolation au niveau des combles (laine minérales, isolants biosourcés...), des murs (panneaux enduits) et des fenêtres (double à triple vitrage). L'isolation permet de mieux conserver la chaleur dans l'habitat, et de consommer moins d'énergie pour le chauffage. C'est donc un facteur d'économies financières, de confort, mais aussi de préservation des ressources énergétiques naturelles et de limitation des émissions de gaz à effet de serre (GES).

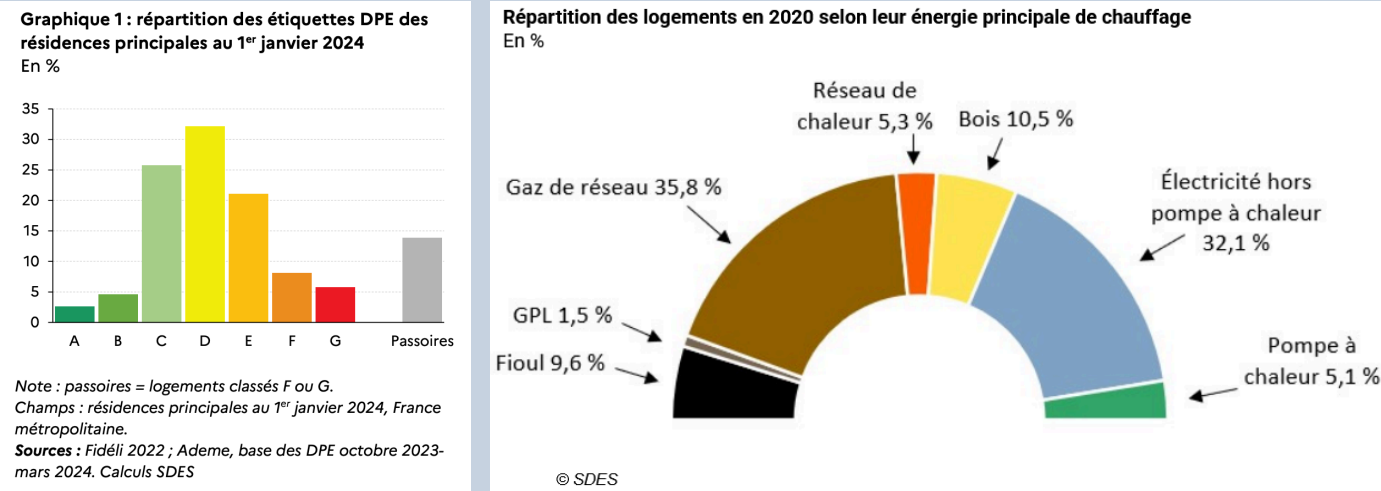
Pour définir le niveau de performance énergétique global d'un logement, on détermine sa classe énergétique. Elle est établie par un Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) prenant en compte la quantité d'énergie primaire consommée et la quantité de GES rejetée.



source: Effy - Calcul du DPE : zoom sur la méthode de calcul 3CL

Les enjeux du résidentiel en France

Le secteur résidentiel-tertiaire représente aujourd'hui 45% de la consommation d'énergie finale (720 TWh en 2019) et 17% des émissions de GES en France. En particulier, le chauffage au gaz et au fioul est responsable de 86 % des émissions des bâtiments (sources: Ademe, MTES).



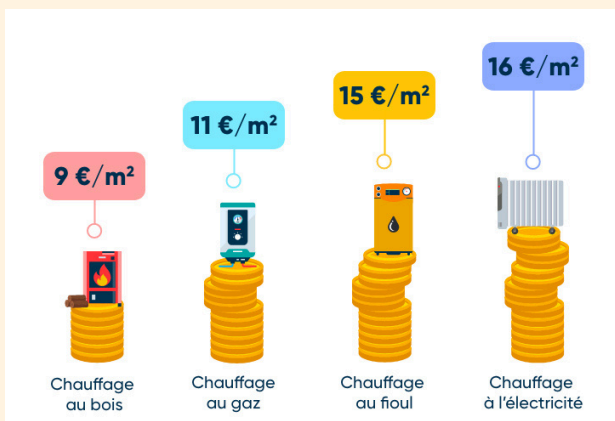
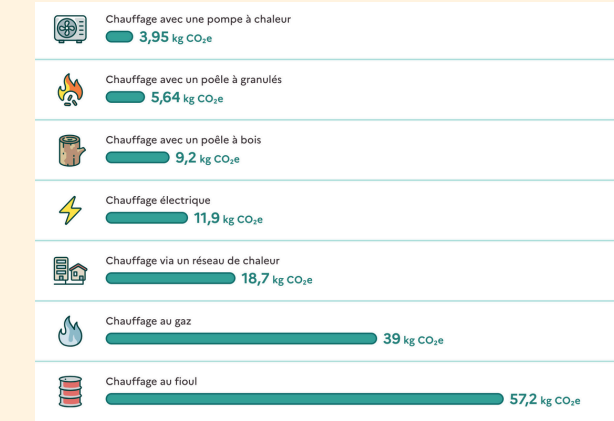
Pour respecter l'Accord de Paris de 2015, chaque Français devrait émettre au maximum 2 tCO<sub>2</sub>e/ an (stratégie nationale bas carbone), contre 10 tCO<sub>2</sub>e/ an aujourd'hui. La décarbonation des quartiers est un des enjeux majeurs pour respecter ces objectifs.

En France, le dispositif MaPrimeRénov' et l'éco-prêt à taux zéro permettent de financer des travaux de rénovation énergétique (objectif: monter de deux classes sur le DPE).

A plus grande échelle, il existe aussi un label EcoQuartier pour les "projets d'aménagements qui intègrent les enjeux et principes de la ville et des territoires durables": bâtiments à faible consommation énergétique recourant aux énergies renouvelables pour le chauffage.

Optimiser le mix énergétique

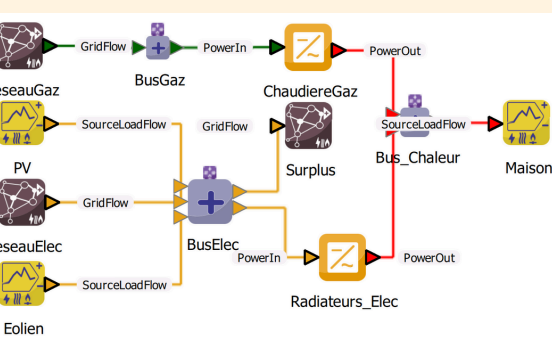
Pour optimiser les types de chauffage d'une habitation, il est nécessaire de prendre en compte à la fois les coûts et les émissions de GES de chaque mode.



kg CO<sub>2</sub>e émis par m<sup>2</sup> en fonction du type de chauffage, source: impactco2.fr

coût moyen du chauffage par an et par m<sup>2</sup> source: Effy, 2019

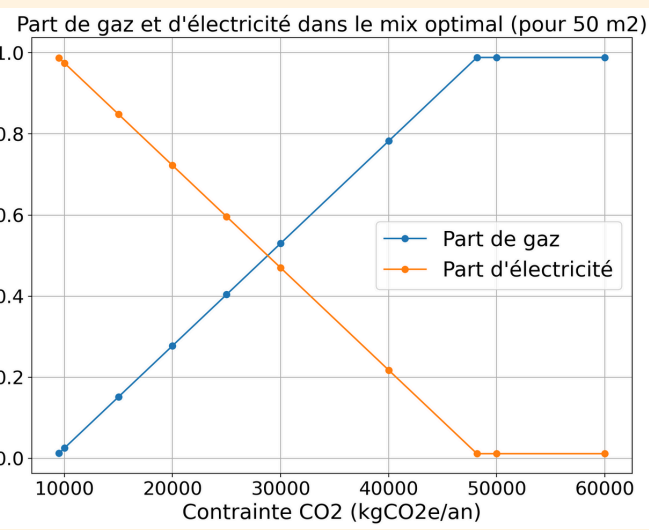
Afin de dimensionner et répartir dans le temps les investissements concernant la décarbonation du chauffage, il est nécessaire d'avoir recours à des procédés mathématiques d'optimisation. Dans cette optique, le logiciel open-source d'optimisation linéaire Cairn-Open, développé par le CEA-Liten, permet de modéliser des systèmes énergétiques et optimiser leur dimensionnement et pilotage selon les paramètres économiques et environnementaux choisis.



Modélisations de sources de chaleur sur Cairn Open

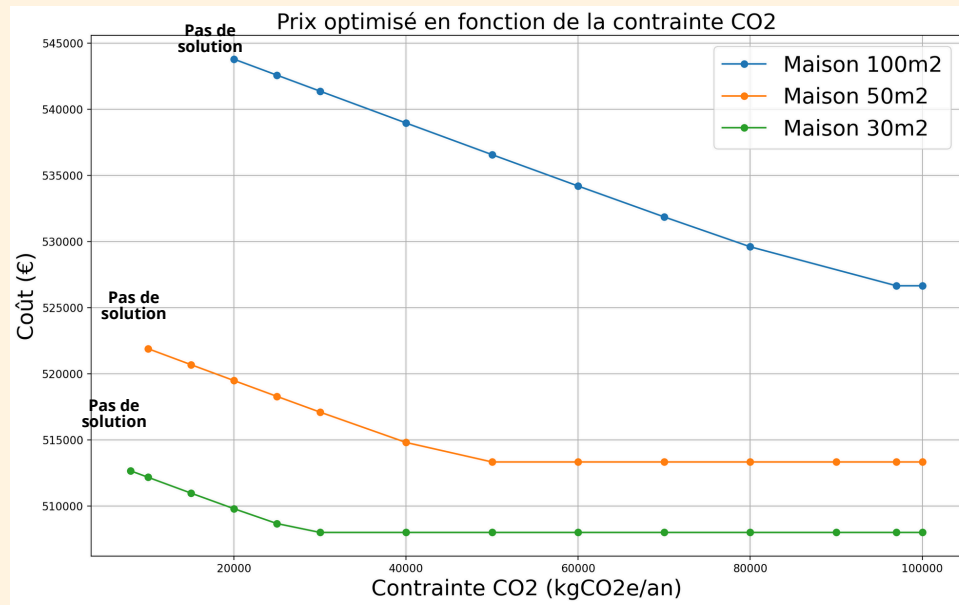
Dans ce modèle, on considère un logement dont la taille et les moyens de chauffage peuvent varier. On ajoute des contraintes d'émission de GES, et on obtient un mix énergétique ou une taille maximale de logement par exemple selon le paramètre optimisé.

Mix Gaz/Electricité



- Gaz moins cher que l'électricité : sans contrainte CO<sub>2</sub>, ce mode de chauffage est favorisé par le logiciel.
- Ajout d'une contrainte d'émission: la part du gaz diminue pour être remplacée par les radiateurs électriques.

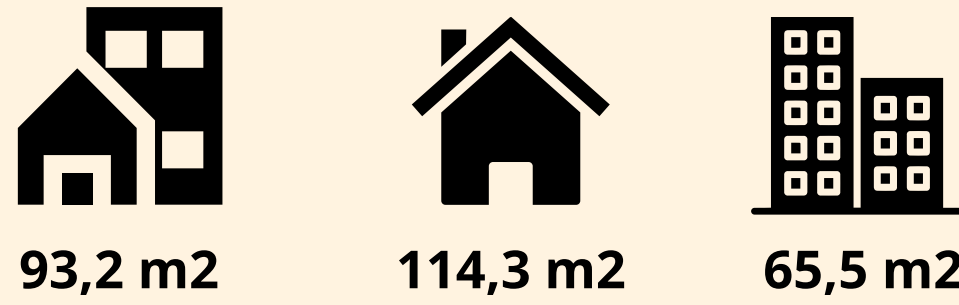
Front de Pareto:  
Ensemble des optima de Pareto pour des surfaces variées.



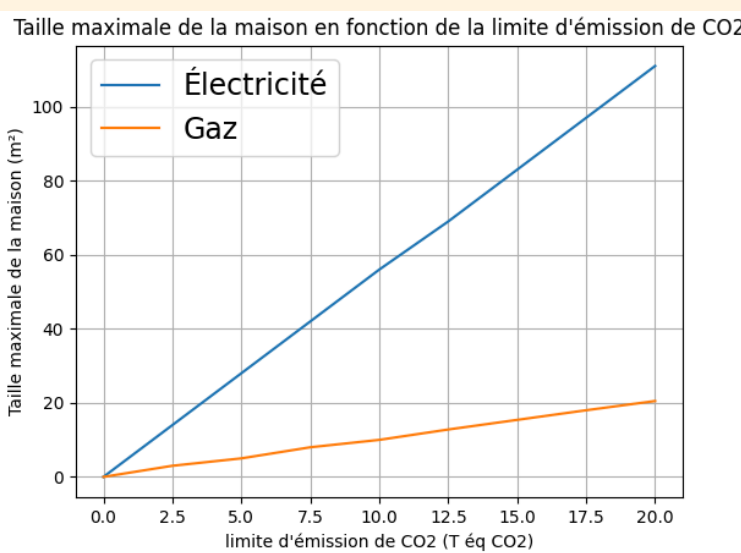
Pour de trop fortes contraintes CO<sub>2</sub>, le système d'optimisation n'admet pas toujours de solution, car certains besoins sont incompressibles. A l'opposé, le prix devient constant à partir d'une contrainte suffisamment large pour permettre de n'utiliser que du gaz.

Taille maximale logement

Taille moyenne des logements en France en 2020 d'après le Ministère de la transition écologique:

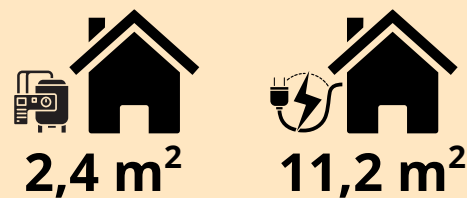


CairnOpen permet de calculer la taille maximale d'un logement en fonction du type de chauffage et de la contrainte d'émission CO<sub>2</sub>:



L'électricité émet moins de GES que le gaz donc permet un logement plus grand.

Taille max du logement dans l'objectif des 2 tCO<sub>2</sub>e/an:



- Modèle linéaire très simplifié mais permettant une première approche.

Ajout PAC, PV, éolien

Une pompe à chaleur (PAC) est un dispositif qui transfère de l'énergie thermique d'un milieu à basse température vers un milieu à haute température. Elle capte la chaleur extérieure de l'air, du sol ou de l'eau et transfère cette énergie pour obtenir une température assez élevée pour chauffer un logement, là où les radiateurs transforment l'électricité en chaleur. L'ajout d'une PAC permet de baisser l'émission de CO<sub>2</sub>.

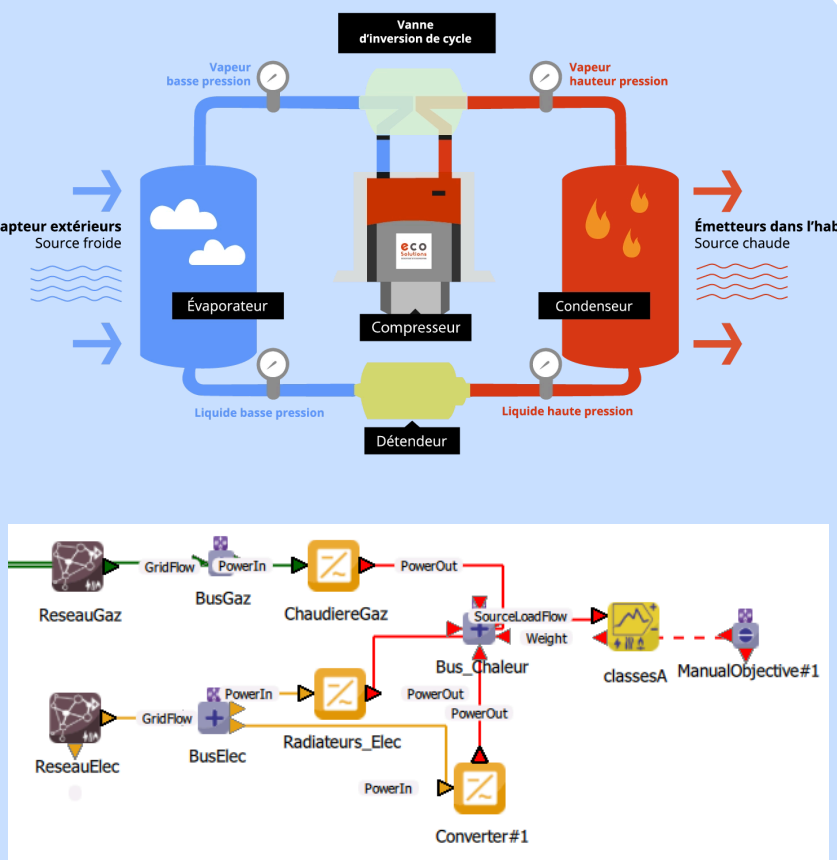
Ici, nous avons modélisé la PAC sur Cairn avec un nouveau Converter (ci-contre). Nous avons effectué ensuite 2 modélisations :

- Modélisation où on maximise la taille du logement : La PAC a des émissions bien moindres que celles engendrées par les radiateurs électriques ou le chauffage, le mix énergétique produit ne contient donc que la PAC.
- Modélisation où la taille du logement est fixée et on contraint les émissions CO<sub>2</sub> : on obtient un mix énergétique contenant à la fois du gaz, des radiateurs électriques et une production par la PAC. Plus on augmente la contrainte, plus la part d'électricité (PAC/radiateurs) augmente.

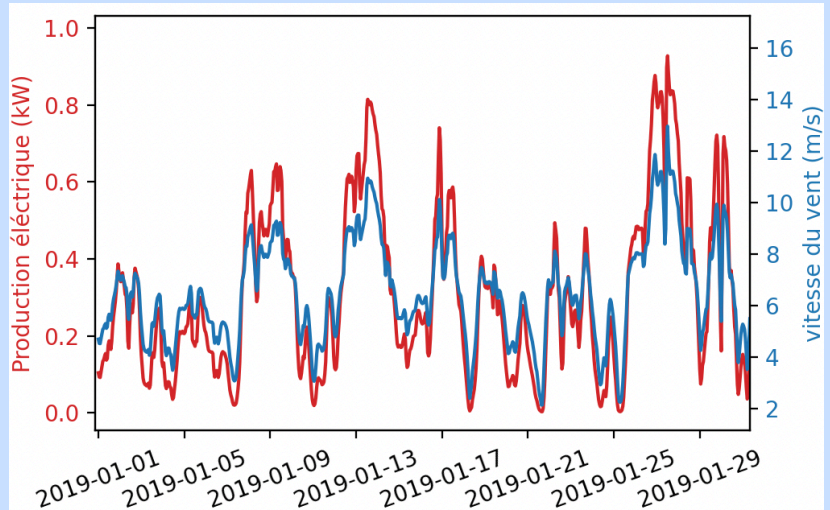
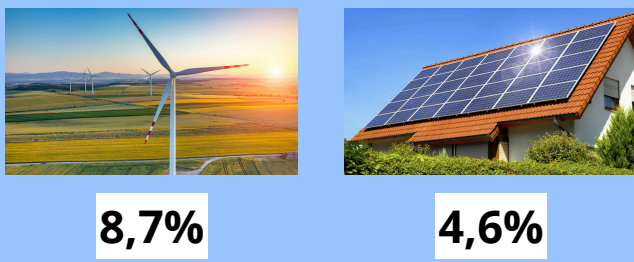
Solaire et éolien, deux sources renouvelables d'électricité pour la décarbonation:

Modélisation Cairn: Implémentation d'un apport en électricité photovoltaïque et un bloc correspondant à une éolienne, avec les productions annuelles du site Renewables.ninja (développé par l'Imperial College London et l'ETH Zürich) en choisissant la localisation de l'école des Mines à Paris.

- Ces énergies sont avantagées par le modèle pour une contrainte d'émission importante.
- Cependant, elles sont non pilotables et intermittentes: nos résultats indiquent une utilisation non nulle des radiateurs électriques (hors éolien) → il existe des moments dans l'année où aucune énergie n'est produite par l'éolien et le solaire (nuit sans vent par exemple).
- Le modèle choisi intègre la production par éolienne comme si elle était construite à côté de la maison et non pas intégrée au réseau électrique français: il manque donc de réalisme pour représenter l'apport d'une telle source d'énergie.



Part dans la production électrique française en 2024 (RTE):



Conclusion et améliorations

- Aujourd'hui, la PAC joue un rôle crucial dans la décarbonation en Europe. Elle permet en effet de baisser drastiquement les émissions de CO<sub>2</sub>. Il faudrait alors augmenter le taux de remplacement des appareils de chauffage à énergie fossile pour atteindre la neutralité carbone.
- Les chauffages à l'électricité provenant de sources renouvelables comme le solaire ou l'éolien sont aussi des pistes pour la décarbonation.

Pistes d'amélioration:

- Implémenter l'isolation sur CairnOpen.
- Ici, nous avons travaillé sur une DPE G, il serait intéressant d'explorer d'autres DPE.
- Le modèle CairnOpen pourrait se généraliser à un quartier entier en ajoutant d'autres blocs "maison"
- Il pourrait être intéressant de se pencher sur d'autres points de décarbonation d'un quartier (gestion des déchets, transports...)

Un investissement rentable?

La rentabilité, qu'est ce que c'est ?

Il est rentable de réduire les émissions si l'ensemble des coûts est inférieur aux revenus totaux pendant la durée de l'investissement.

Pour le cas de la PAC, sa rentabilité n'est pas universelle : elle dépend de nombreux facteurs comme le système remplacé, la taille et l'isolation du logement... Les économies d'énergie sont en effet plus importantes lorsque la PAC remplace un système énérgivore (chaudière fioul, gaz).

