

# CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE EN FRANCE : Une bonne idée pour le climat ?

*Pôles Énergie et Bâtiment*

**Brice Castelli**

*Consultant Bâtiment*

**Sébastien Girault**

*Consultant Energie*

**Natan Leverrier**

*Consultant Bâtiment*

**Alexandre Joly**

*Responsable du Pôle Energie*

*alexandre.joly@carbone4.com*

Juin 2020

# RÉSUMÉ EXECUTIF

**Grande spécificité française, le chauffage électrique est beaucoup plus présent** dans nos logements que chez nos voisins européens. Héritage historique d'une quête vers une plus grande indépendance énergétique, est-ce **cohérent** aujourd'hui avec nos **objectifs climatiques** ? En effet, les moments où nous avons **besoin de chauffage** sont très variables et **nécessitent l'activation** de moyens de **production flexibles** carbonés comme les **centrales thermiques** (charbon ou au gaz naturel).

Pour rappel, l'électricité produite sur une année émet environ 57 gCO<sub>2</sub>e/kWh en France (grâce notamment au nucléaire, cf 1.1), à comparer au 30 gCO<sub>2</sub>e/kWh du bois, au 205 gCO<sub>2</sub>e/kWh PCS du gaz naturel et au 324 gCO<sub>2</sub>e/kWh du fioul, tous les trois brûlés directement dans une chaudière.

Cependant, **l'électricité répond à de multiples usages** (éclairage, informatique, télévision, chauffage, climatisation, etc.) qui ont des **profils de consommation très différents** : l'informatique à peu près toute la journée quand le chauffage se fait en hiver et plutôt le soir. Autrement dit, **si on allouait de façon temporelle les émissions de la production correspondante à un usage donné, de combien est-ce que le chauffage électrique émettrait plus ?**

Nous décrivons **3 méthodes d'allocation** dans cette publication :

**1** Méthode dite « **saisonnalisée** » : elle consiste à établir, d'une part pour la production et d'autre part pour la consommation une part saisonnée et une part non saisonnée. C'est la méthode actuellement utilisée par l'ADEME et le label E+C-.

**2** Méthode dite « **mensualisée** » : elle détermine un contenu carbone mensuel de la production d'électricité et à l'attribuer de manière proportionnelle à la consommation mensuelle d'un usage.

**3** Méthode dite « **marginale** » : il s'agit de prévoir quel serait le moyen de production électrique nécessaire pour répondre à la demande d'1 kWh de chauffage électrique supplémentaire.

Sans rentrer dans plus de détails, voici les résultats :

### Synthèse des résultats pour l'usage chauffage

Méthode	Facteur d'émission chauffage (gCO <sub>2</sub> e/kWh)	Source
<b>Saisonnalisée</b>	147	ADEME
<b>Mensualisée</b> (Pas de temps = mois)	80 70	ADEME Analyse Carbone 4
<b>Mensualisée</b> (Pas de temps = heure)	79	ADEME
<b>Marginale</b> (Pas de temps = heure)	149	Analyse Carbone 4 sur données Electricity Map

**Aujourd'hui, le chauffage électrique "classique" se trouve ainsi au milieu de la fourchette : moins carboné que le gaz naturel mais plus que le bois.** Pour une pompe à chaleur, on se rapprocherait du bois.



Quant à savoir quelle méthode utiliser, elles **correspondent toutes à des calculs théoriques, avec leurs conventions et leurs biais.**

**A long terme, quantifier l'impact climatique du chauffage électrique** doit pondérer beaucoup de dynamiques dont entre autres :

- Massification des **rénovations thermiques** dans le résidentiel-tertiaire
- **Pénétration des pompes à chaleur** plus efficaces énergétiquement
- Evolution du **mix de production** et des **prix des énergies**
- Changements des **comportements de chauffage**
- Réchauffement climatique conduisant à des **hivers moins rigoureux**

En se projetant avec la **Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) française**, les **consommations électriques dans le résidentiel-tertiaire diminuent à l'horizon 2050, malgré l'électrification du chauffage** [1]. Pour des raisons climatiques, sont ainsi prévues une **augmentation du chauffage électrique** (radiateurs et pompes à chaleur), des **réseaux de chaleur** à partir de biomasse et une **diminution de la part du gaz**.

[1] <http://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2019/11/Publication-Carbone-4-Pointe-Electrique.pdf> ; page 24

# Sommaire

	p5	<b>Introduction</b>	
<b>1</b>	p6	<b>Le chauffage en France : quelles consommations ? Quelles évolutions ?</b>	
		<b>1.1</b>	p7 La transition bas carbone du chauffage à peine amorcée
		<b>1.2</b>	p9 Controverse sur le facteur d'émission du chauffage électrique
<b>2</b>	p10	<b>Pourquoi y-a-t-il plusieurs facteurs d'émission de l'électricité ? Qu'est ce qu'un facteur d'émission « par usage » ?</b>	
		<b>2.1</b>	p10 Que comptabilise-t-on dans les facteurs d'émission de l'énergie ?
		<b>2.2</b>	p12 La décomposition par usage : pourquoi l'électricité est un cas particulier ?
		<b>2.3</b>	p13 Quelles sont les différentes méthodes de comptabilisation des facteurs d'émission de l'électricité ?
<b>3</b>	p14	<b>Méthode saisonnalisée par usage vs. Méthode mensualisée par usage : quésaco ?</b>	
		<b>3.1</b>	p14 Méthode saisonnalisée par usage
		<b>3.2</b>	p17 Méthode mensualisée par usage
<b>4</b>	p21	<b>La méthode marginale : si on ajoute marginalement du chauffage électrique, quel moyen de production faut-il mobiliser ?</b>	
		<b>4.1</b>	p21 Méthodologie
		<b>4.2</b>	p24 Résultats
	p27	<b>Conclusion</b>	

# Introduction.

Bien que l'hiver dernier ait été le plus chaud en France depuis le début du XXe siècle (avec une moyenne de 2 à 3°C au-dessus des normales de saison), la consommation électrique a encore atteint son pic à cette période de l'année. En effet, la forte proportion de chauffage électrique dans notre pays a induit une augmentation de la demande de l'ordre de 25% par rapport aux périodes estivales [1]. Pour répondre à un tel pic, il faut alors faire appel à des moyens de production flexibles comme des centrales thermiques à flamme (charbon [2], fioul, gaz), de l'hydroélectricité ou du nucléaire.

Or, les moyens thermiques sont beaucoup plus carbonés que le nucléaire et l'hydroélectricité prépondérants en temps normal. Se pose alors la question suivante : le chauffage électrique est-il vraiment une bonne solution, dans la mesure où ses périodes d'activations nécessitent d'activer des centrales carbonées ? Ne vaut-il pas mieux utiliser du chauffage au gaz ?

[1] Source RTE BP 2016 p42

[2] Pour rappel, il reste en 2020 4 centrales charbons ouvertes en France





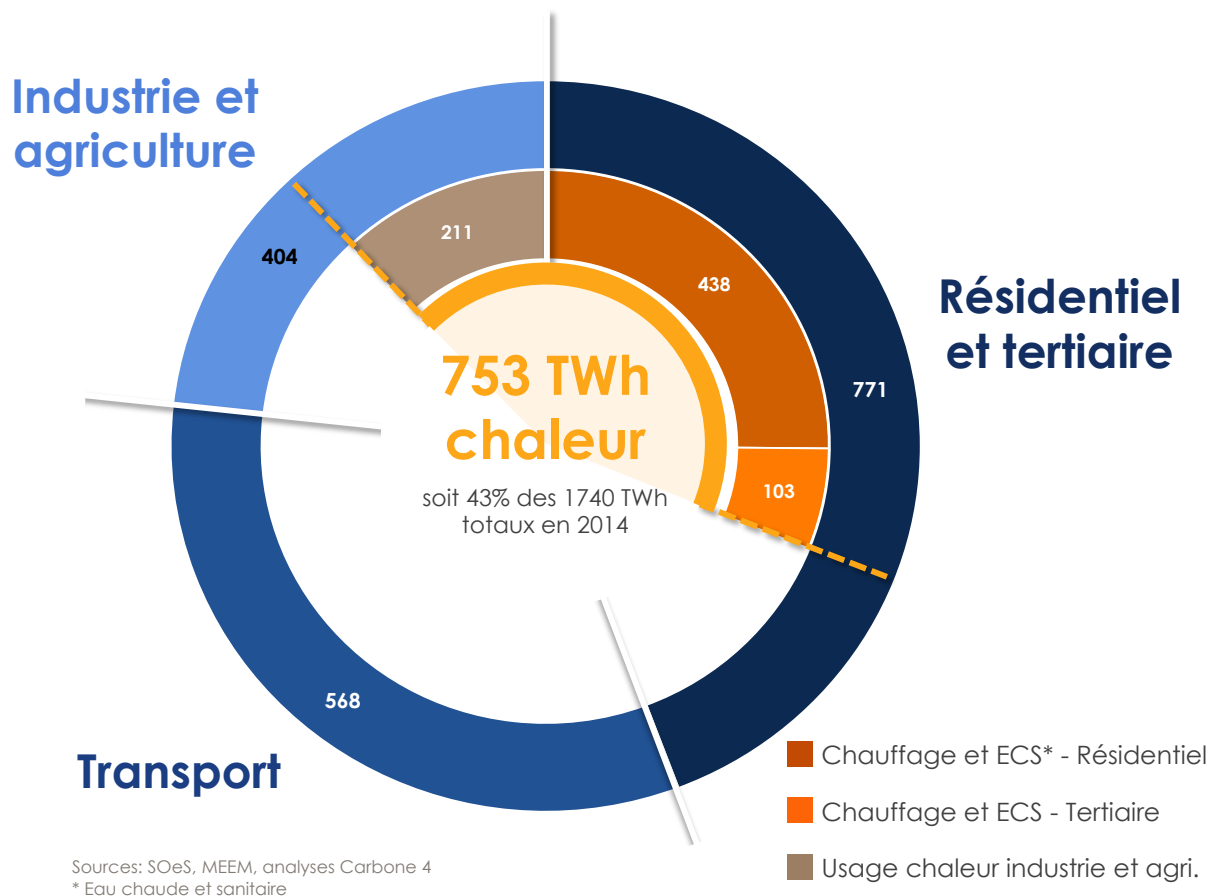
# 1

## Le chauffage en France : quelles consommations ? quelles évolutions ?

En France, la décomposition des consommations énergétiques par usages fait apparaître un usage prépondérant de la chaleur : elle représente près de la moitié de la consommation d'énergie finale. Les trois quarts de cette chaleur sont consommés par le résidentiel et le tertiaire pour le chauffage et pour l'eau chaude sanitaire (ECS) tandis que le quart restant est consommé par l'industrie.

Pour un panorama détaillé de la production et de la consommation de chaleur en France voir la publication de Carbone 4 "[Chaleur renouvelable : les moyens consacrés en France à son développement sont-ils à la hauteur ?](#)"

Part des usages chaleur par secteur dans la consommation d'énergie finale en France (2014)

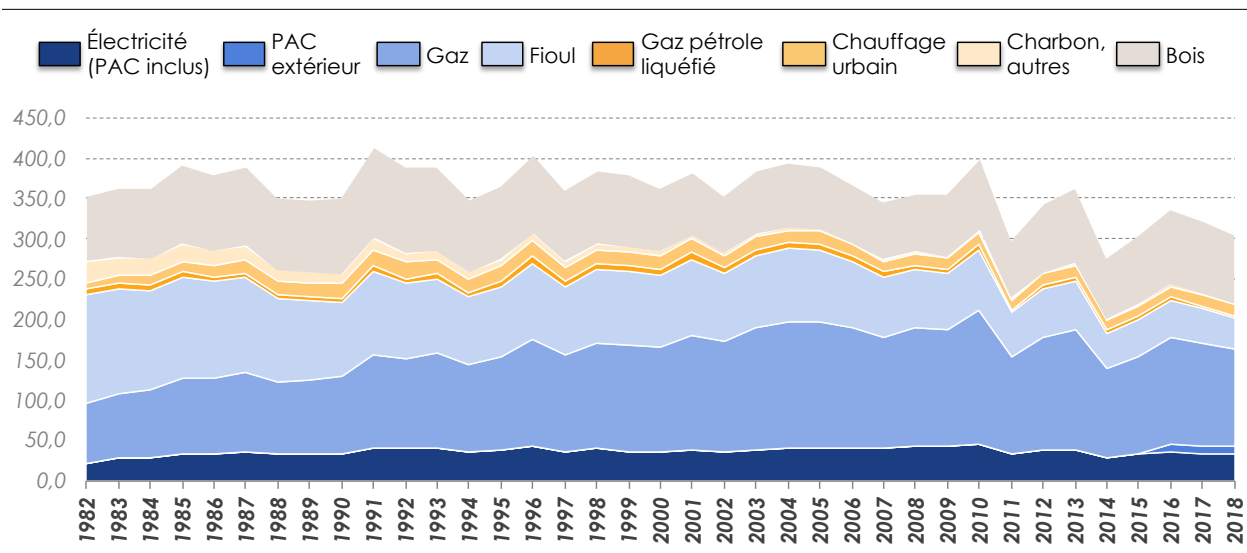


En se concentrant sur le chauffage uniquement (dans les bâtiments résidentiels et tertiaires), les consommations énergétiques en France ont représentées près de 400 TWh en 2018, soit environ 25% de la consommation d'énergie finale en France et plus de la moitié des consommations du secteur résidentiel-tertiaire [1].

## 1.1 La transition bas carbone du chauffage à peine amorcée

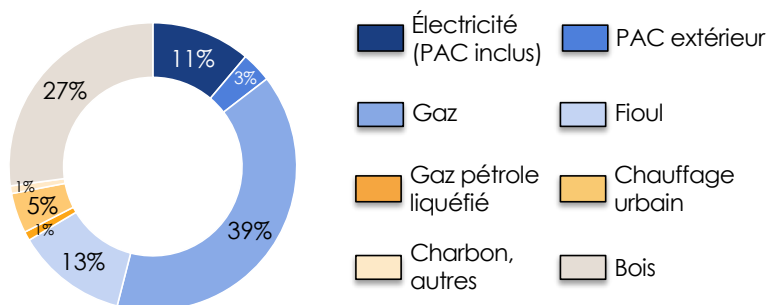
Depuis plusieurs années, la consommation totale du chauffage en France diminue légèrement grâce à la construction de logements neufs plus performants, à la rénovation, la diffusion de moyen de chauffage efficace et la baisse de la rigueur climatique (le climat se réchauffe déjà !). Du côté des énergies fossiles, le fioul et le gaz demeurent les principaux vecteurs énergétiques utilisés pour un peu plus de 50% de nos besoins ; bien que la part du fioul domestique a baissé significativement ces dernières années.

Évolution de la consommation du chauffage résidentiel en France, 1982 | 2018 (TWh)



Source : CEREN

Répartition de la consommation du chauffage résidentiel en France en 2018

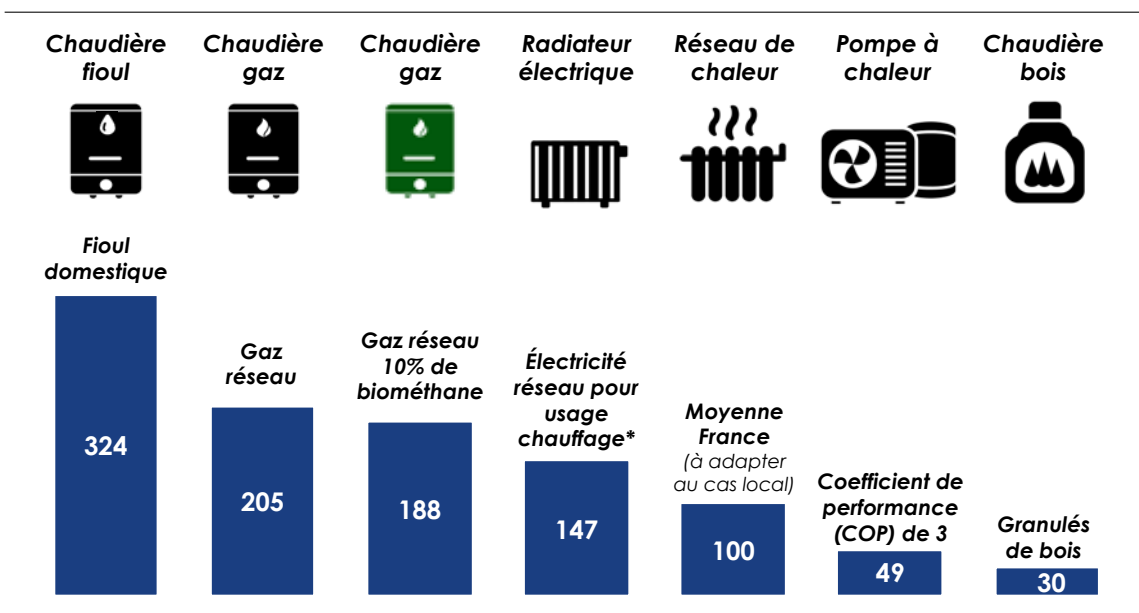


Source : CEREN

[1] <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-09/datalab-59-chiffres-cles-energie-edition-2019-septembre2019.pdf>

Les émissions de gaz à effet de serre de ces consommations énergétiques varient selon le vecteur énergétique. Ainsi le contenu carbone des vecteurs énergétiques de chauffage, autrement dit leur facteur d'émissions [1], fait ressortir un ordre de mérite carbone des solutions de chauffage (cf. article Carbone 4 : les chaudières gaz sont-elles compatibles avec la lutte contre le changement climatique ? [2]). Les facteurs d'émission pour l'usage chaleur publiés par l'ADEME donnent les résultats du graphique suivant (Note : le facteur d'émission de l'électricité que nous retenons ici est celui publié par l'ADEME pour l'usage chauffage. Il correspond à la méthode saisonnalisée par usage que nous détaillons et analysons dans la suite du document) :

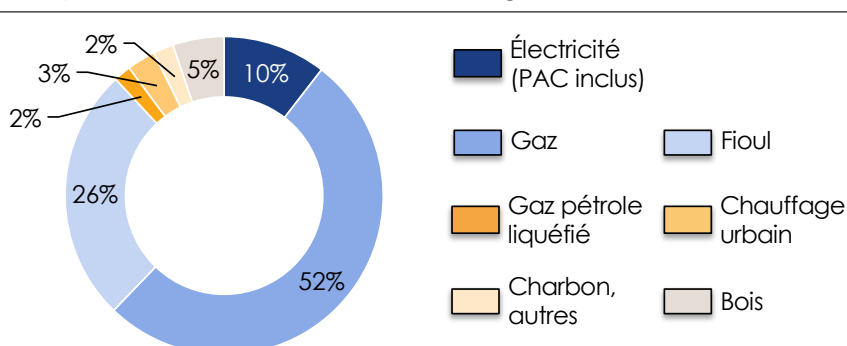
### Émissions de gaz à effet de serre (gCO<sub>2</sub>e) pour la consommation d'un 1kWh PCS de chauffage



Source : Base carbone ADEME ; étude Quantis/GRDF « Évaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel en appliquant une approche d'allocation »  
 Notes : (\*) méthode saisonnalisée

En utilisant ces facteurs d'émission, la répartition de l'empreinte carbone du chauffage en France est la suivante, à comparer à la répartition des consommations énergétiques :

### Répartition des émissions du chauffage résidentiel en France en 2018



Source : CEREN, facteurs d'émissions de la Base Carbone® de l'ADEME

[1] Un facteur d'émission permet de convertir un quantité physique, telle que les kilowattheures, en quantité équivalente de gaz à effet de serre.

[2] <http://www.carbone4.com/analyse-chaudieres-gaz-climat/>



## 1.2 Controverse sur le facteur d'émission du chauffage électrique

Les annonces du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) concernant réglementation environnementale des bâtiments neufs [1], en cours d'élaboration, a relancé une controverse sur le facteur d'émission de l'électricité pour l'usage du chauffage. En effet, tandis que la méthode préfigurant la réglementation à venir utilise un facteur d'émission du chauffage électrique à 210 gCO<sub>2</sub>e/kWh [2], les annonces du MTES prévoient l'utilisation d'un facteur d'émission à 79 gCO<sub>2</sub>e/kWh.

Alors que cette nouvelle réglementation prévoit d'imposer un seuil carbone minimum pour la construction, cette baisse donne un avantage significatif au chauffage électrique : cela est-il légitime ?

Comme évoqué en introduction, il est souvent expliqué que le chauffage électrique est très carboné car les consommations de chauffage ont lieu lors des pics de consommations électriques ("la fameuse pointe à 19h en hiver"). En effet, il faudrait alors activer de façon rapide des moyens de production dit pilotables : l'hydraulique et le nucléaire [3] ne suffisent généralement pas, il faudrait alors allumer les centrales au charbon et au gaz fossiles.

Certes, cette situation peut ponctuellement arriver mais elle n'est pas nécessairement généralisable et ne doit pas faire oublier les autres moments où le chauffage est utilisé hors pics. Le mix électrique étant principalement décarboné en France, qu'en est-il réellement ?

Cette publication propose d'explorer cette controverse en trois parties :

1. Pourquoi y-a-t-il plusieurs facteurs d'émission de l'électricité ? Qu'est-ce qu'un facteur d'émission "par usage" ?
2. Méthode saisonnalisée par usage vs. Méthode mensualisée par usage : quésaco ?
3. Méthode marginale : le chauffage au gaz peut-il être moins émissif que le chauffage électrique en France ?

[1] <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus>

[2] Cette valeur, retenue dans le cadre du label E+C-, correspond au facteur d'émission saisonnalisé par usage pour l'année 2016 du scénario RTE "Nouveau Mix"

[3] Le nucléaire est un moyen de production pilotable à travers la modulation de la charge du réacteur.

# 2

## Pourquoi y-a-t-il plusieurs facteurs d'émission de l'électricité ? Qu'est-ce qu'un facteur d'émission « par usage » ?

### 2.1 Que comptabilise-t-on dans les facteurs d'émission de l'énergie

Pour pouvoir comparer différents moyens de production entre eux, il convient de comptabiliser les émissions sur l'ensemble de la durée de vie des installations. Ainsi, usuellement les facteurs d'émission de l'énergie comprennent deux parties : une partie "combustion" et une partie "amont".

La partie "combustion" dépend des propriétés chimiques du combustible et des conditions de combustions.

La partie "amont" intègre trois parties : l'extraction et l'approvisionnement des matières premières (gaz, pétrole, uranium, etc.), les infrastructures (production, transport et distribution) et les pertes en lignes (dans le cas d'une énergie de réseau).

#### Que compte-t-on dans les facteurs d'émission des énergies ?

	Amont			Combustion
	Amont hors infra.	Infrastructure	Pertes en lignes	
<b>Charbon</b>	Extraction et approvisionnement du combustible	Rien	Rien	Combustion à l'équipement
<b>Fioul</b>	Extraction et approvisionnement du combustible	Rien	Rien	Combustion à l'équipement
<b>Gaz</b>	Extraction et approvisionnement du combustible	Construction et maintenance de réseau	Pertes du réseau	Combustion à l'équipement
<b>Bois</b>	Extraction et approvisionnement du combustible	Rien	Rien	Combustion à l'équipement
<b>Electricité</b>	Extraction et approvisionnement du combustible	Construction des centrales + Construction du réseau de transport et distribution	Pertes du réseau	Combustion aux centrales
<b>Réseau de chaleur</b>	Extraction et approvisionnement du combustible	Construction des centrales + Construction du réseau	Pertes du réseau	Combustion aux centrales

Ainsi, déterminer le facteur d'émission d'une énergie consiste à, d'une part, pour la partie combustion, prendre les propriétés chimiques moyennes du combustible concernées et, d'autre part, pour la partie amont, rapporter l'ensemble des émissions à une unité de production qui est associée (1 kWh par exemple).

Les cas de l'électricité et des réseaux de chaleur sont particuliers car ils désignent ici non pas un type de combustible mais un vecteur de transport de l'énergie. Ainsi leur facteur d'émission dépend du mix des moyens de production (par exemple nucléaire, hydraulique, gaz, solaire, déchets, etc.). Pour un réseau donné, c'est le mix de production du réseau qui donne le mix des facteurs d'émission à utiliser : la moyenne pondérée de ces facteurs d'émission sur une période donnée donne le **facteur d'émission moyen** sur cette période.

<u>Illustratif</u>	Facteur d'émission par moyen de production en gCO <sub>2</sub> e / kWh	Répartition de la production sur un mois (par exemple) - en %	Facteur d'émission moyen en gCO <sub>2</sub> e / kWh
<b>Nucléaire</b>	6 gCO <sub>2</sub> e / kWh	70%	} <b>37 gCO<sub>2</sub>e / kWh</b>
<b>Hydraulique</b>	6 gCO <sub>2</sub> e / kWh	10%	
<b>Gaz</b>	418 gCO <sub>2</sub> e / kWh	5%	
<b>Etc.</b> Autres moyens de productions	Facteurs d'émission des autres moyens de production	15%	

Source : ADEME

Le gaz aussi est une énergie de réseau. En toute rigueur, son facteur d'émission dépend du mix de gaz présent dans le réseau : c'est à dire la proportion de gaz naturel et des différents types de biométhane. Toutefois, aujourd'hui et dans les prochaines années, la proportion de gaz naturel dans le mix français reste et restera prépondérant (plus de 99% aujourd'hui, environ 90% à l'horizon 2030 [1]), on peut donc considérer le facteur d'émission du gaz comme relativement stable.

<u>Potentiel 2030</u>	Facteur d'émission par type de gaz en gCO <sub>2</sub> e / kWh PCS	Répartition du mix en %	Facteur d'émission moyen en gCO <sub>2</sub> e / kWh PCI
<b>Gaz naturel</b>	205 gCO <sub>2</sub> e / kWh	90%	} <b>188 gCO<sub>2</sub>e / kWh PCI</b>
<b>Biométhane</b>	40 gCO <sub>2</sub> e / kWh	10%	

Source : Base carbone ADEME ; étude Quantis/GRDF « Évaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel en appliquant une approche d'allocation »

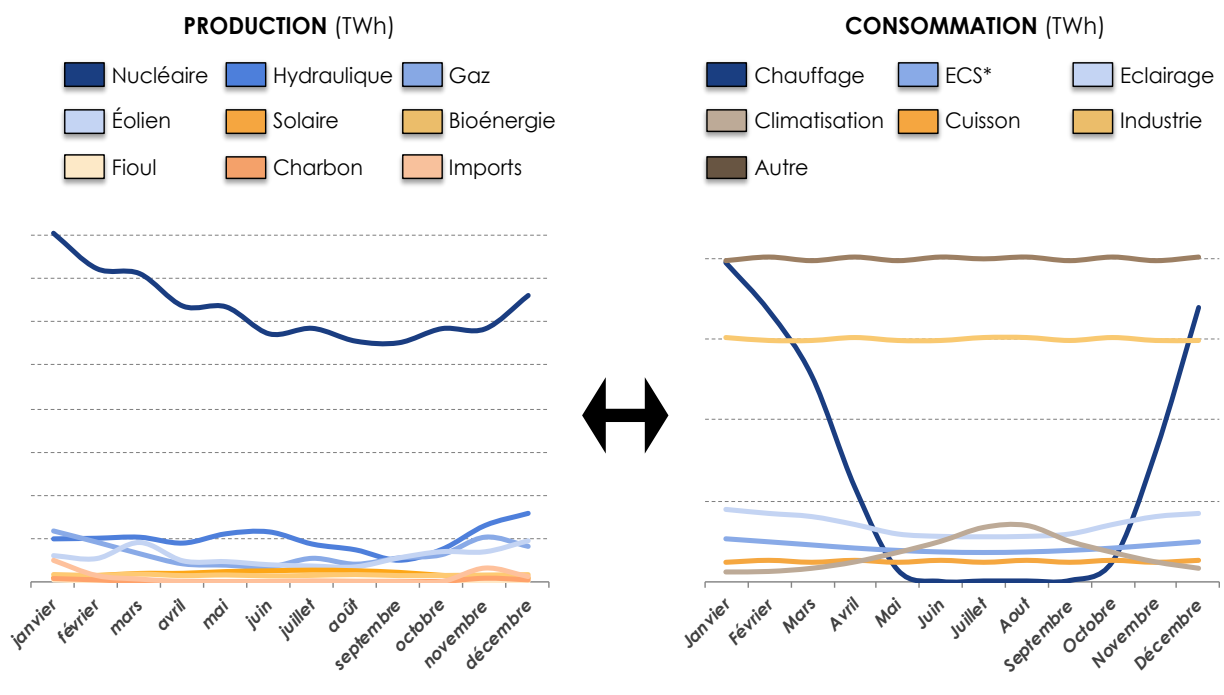
## 2.2 La décomposition par usage : pourquoi l'électricité est un cas particulier ?

Il faut ensuite étudier deux cas de figure pour estimer le facteur d'émission d'une énergie pour un usage : lorsque le facteur d'émission dépend du moment de la consommation de cette énergie ou, à l'inverse, lorsque le facteur d'émission n'en dépend pas.

En effet la combustion d'un 1 kWh de gaz du réseau ou d'une bûche de bois émet la même quantité de gaz à effet de serre quelque soit le moment de sa consommation. À l'inverse pour l'électricité, l'analyse est plus complexe puisque l'impact carbone d'une consommation électrique varie selon les moyens de production mobilisés pendant la période de consommation (nucléaire, thermique, renouvelable, etc.).

Elaborer un facteur d'émission de l'électricité revient ainsi à effectuer une moyenne temporelle des moyens de production mobilisés pour une consommation donnée.

Profils de production d'électricité par moyen de production et profils de consommation par usage *Illustratif*



Enfin, une autre spécificité de l'électricité est qu'elle peut être utilisée pour différents usages (allumer une ampoule, faire fonctionner un ordinateur, produire de la chaleur, etc.). On peut ainsi distinguer l'usage chauffage qui correspond aux consommations d'électricité destinés à produire de la chaleur.

Donner un facteur d'émission par usage consiste alors à associer les moyens de productions de l'électricité aux consommations sur cette usage sur une période donnée.

## 2.3 Quelles sont les différentes méthodes de comptabilisation des facteurs d'émission de l'électricité?

Dès lors, plusieurs méthodes existent pour estimer le contenu carbone d'un kWh de chauffage électrique avec des hypothèses et des conventions différentes pour chacune d'entre elles. L'ADEME rappelle que "le calcul d'un contenu en CO<sub>2</sub> par usage relève donc nécessairement de simplifications méthodologiques et de conventions, qu'il convient d'explicitier pour en connaître les limites et éviter d'en faire un sujet de controverses"

Ainsi le facteur d'émission peut varier selon la période d'analyse (annuelle, mensuelle, journalière, horaire), les usages analysés (tous usages, chauffage, ECS [1], etc.), et le type d'analyse (moyen ou marginal).

Liste des méthodes les plus courantes de calcul du facteur d'émission de l'électricité

	Période temporelle	Usage	Commentaire
Facteur d'émission temporels	Annuel	Tous usages	Simple mais ne reflète pas la variabilité du système électrique
	Mensuel	Tous usages	Reflète bien les saisons
	Horaire	Tous usages	Précis mais peu adapté aux périodes longues (capacité de calcul)
Facteur d'émission par usage	Saisonnalisé	Par usage	Méthode utilisée actuellement pour les facteurs d'émissions par usage de la Base Carbone® de l'ADEME et pour le référentiel E+C- (empreinte carbone des bâtiments neufs)
	Mensuel	Par usage	Méthode envisagée dans la future réglementation environnementale des bâtiments neufs (RE2020)
Facteur d'émission marginal	Horaire	Tous usage ou par usage	Vision dynamique (pas en bilan comme les autres) pour évaluer comment le système évolue avec une demande additionnelle ou en moins

Dans le cadre de cette publication nous tâchons de mettre à plat et d'apporter un regard critique sur 3 méthodes de calcul : saisonnalisée par usage, mensualisée par usage (partie 2) et marginale (partie 3).

[1] ECS : Eau Chaude Sanitaire

# 3

## Méthode saisonnalisée par usage vs. Méthode mensualisée par usage : quésaco ?

### 3.1 Méthode saisonnalisée par usage

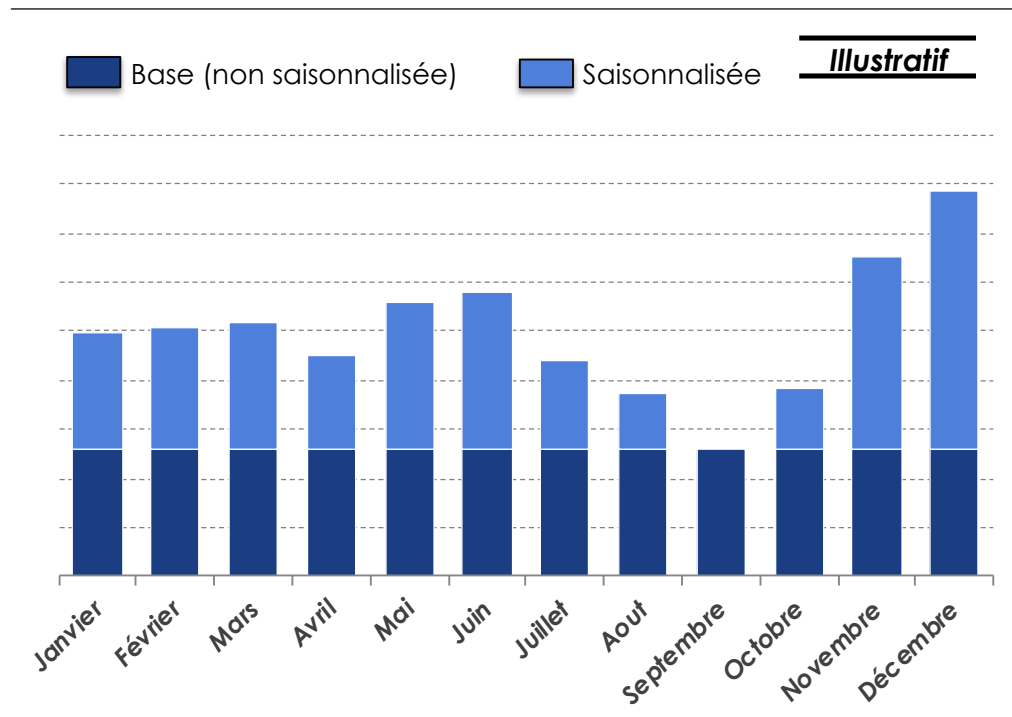
#### 3.1.1 Mode de calcul

La méthode dite saisonnalisée par usage est la méthode utilisée aujourd'hui pour les facteurs d'émission par usage publiés sur le site de l'ADEME ([bilan-ges.ademe.fr](http://bilan-ges.ademe.fr)) et utilisés pour le référentiel E+C- (qui préfigure la réglementation RE 2020 pour les bâtiments neufs).

Elle est dite saisonnalisée car elle consiste à établir, d'une part pour la production et d'autre part pour la consommation une part saisonnalisée et une part non saisonnalisée.

Pour chaque moyen de production, on identifie le mois avec la production minimale. Ce niveau définit la part non saisonnalisée, c'est à dire le niveau de consommation qui ne varie pas au cours de l'année. Pour tous les autres mois de l'année, la production au-dessus de ce seuil est dite saisonnalisée.

#### Profil de production de l'hydraulique



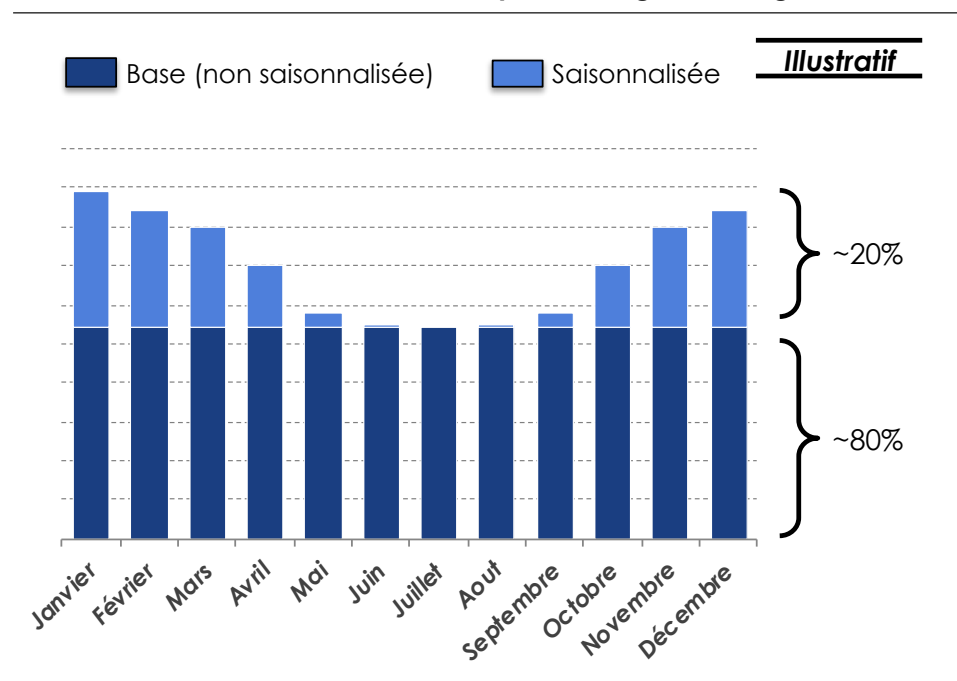
Source : Analyse Carbone 4



En cumulant ce raisonnement et en additionnant les volumes de productions saisonnalisées pour chaque mode de production, on obtient le mix de production annuel saisonnalisé auquel correspond un facteur d'émission annuel de production saisonnalisée. En appliquant la même méthode sur les volumes non saisonnalisés, on obtient le facteur d'émission annuel non saisonnalisé.

De la même manière pour la consommation, pour un usage donné, on prend le minimum mensuel de consommation sur cet usage. Toute la consommation restante qui est au-dessus de ce seuil mensuel minimal est alors considérée comme une consommation saisonnalisée. La consommation en dessous de ce seuil est une consommation non saisonnalisée.

### Profil de consommation pour l'usage Éclairage



Source : Analyse Carbone 4

On obtient ainsi pour chaque usage un pourcentage de consommation saisonnalisée et un pourcentage non saisonnalisé. En appliquant ce pourcentage aux facteurs d'émission de productions calculés précédemment, on obtient le facteur d'émission pour chacun des usages.

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Facteur d'émission d'un usage} = \\
 & \text{Facteur d'émission saisonnalisé}_{\text{usage}} \times \text{Consommation saisonnalisée}_{\text{usage}} \\
 + & \text{Facteur d'émission non - saisonnalisé}_{\text{usage}} \times \text{Consommation non - saisonnalisée}_{\text{usage}}
 \end{aligned}$$

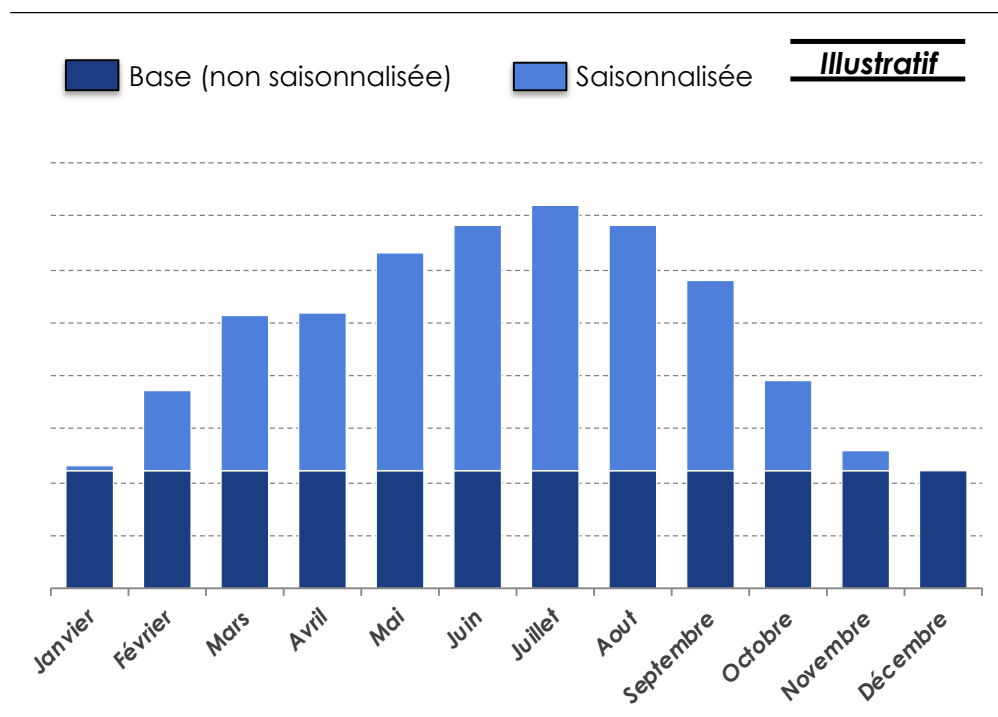
### 3.1.2 Commentaire

Si, dans son principe, cette méthodologie semble correcte, dans la réalité elle est trop simpliste et aboutit à des résultats parfois absurdes. Il n'y a pas toujours une bonne correspondance entre les productions et les consommations d'électricité. En effet, une partie de la production d'été se retrouve dans des consommations d'hiver et inversement.

Trois cas illustrent cela : le chauffage, la production photovoltaïque et la climatisation.

Le chauffage est une consommation qui a lieu principalement lors des mois d'hiver et est donc un usage presque entièrement saisonnalisé. La production photovoltaïque qui a lieu principalement au printemps et en été (au moment du meilleur ensoleillement en France), est également une production presque entièrement saisonnalisée. Dès lors, la méthode saisonnalisée revient à attribuer la production de photovoltaïque d'été à la consommation de chauffage d'hiver (ce qui n'est évidemment pas le cas !)

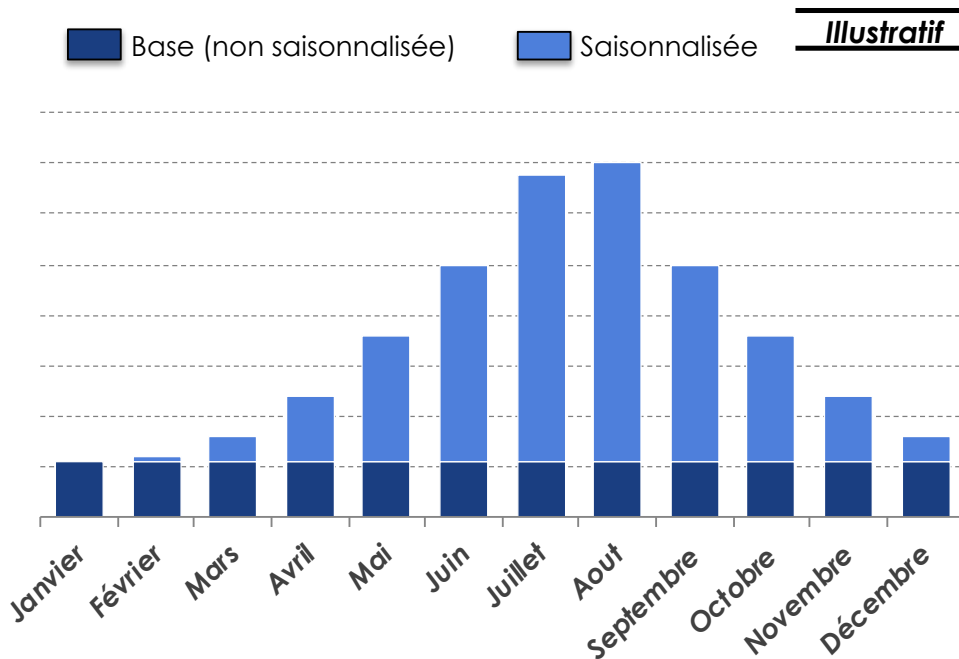
#### Profil de production du solaire



Source : Analyse Carbone 4

Inversement, la climatisation est une consommation 100% saisonnalisée qui a lieu en été. Cet usage se voit donc attribuer le facteur d'émission saisonnalisé. Or globalement (sauf dans le cas du photovoltaïque), les productions saisonnalisées sont principalement produites en hiver avec les production nucléaire et thermique à flamme (gaz, fioul, charbon).

## Profil de consommation pour l'usage climatisation



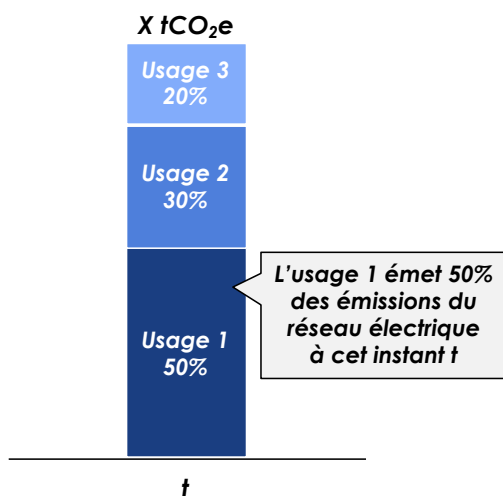
Source : Analyse Carbone 4

## 3.2 Méthode mensualisée par usage

### 3.2.1 Mode de calcul

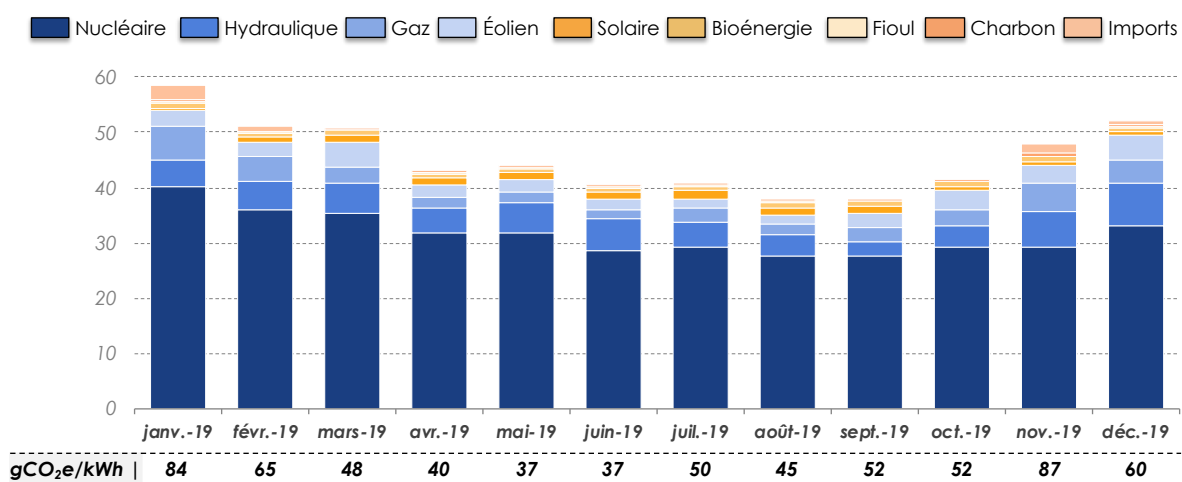
Cette méthode consiste à déterminer un contenu carbone mensuel de la production d'électricité et à l'attribuer de manière proportionnelle à la consommation mensuelle d'un usage. Le schéma ci-dessous décrit le principe sur lequel s'appuie la méthode, c'est-à-dire, la répartition des différents usages dans le temps. Pour la méthode mensualisée le pas de temps sera naturellement le mois mais ce dernier est modulable, en effet le choix du pas horaire est également possible.

## Répartition des émissions du réseau électrique à un instant t



Pour déterminer le contenu carbone mensuel, il convient d'identifier les différents moyens de production sollicités lors des différents mois de l'année. Le graphique ci-dessous représente les mix de production mensuels pour l'année 2019.

### Production d'électricité mensuelle en 2019 (TWh)

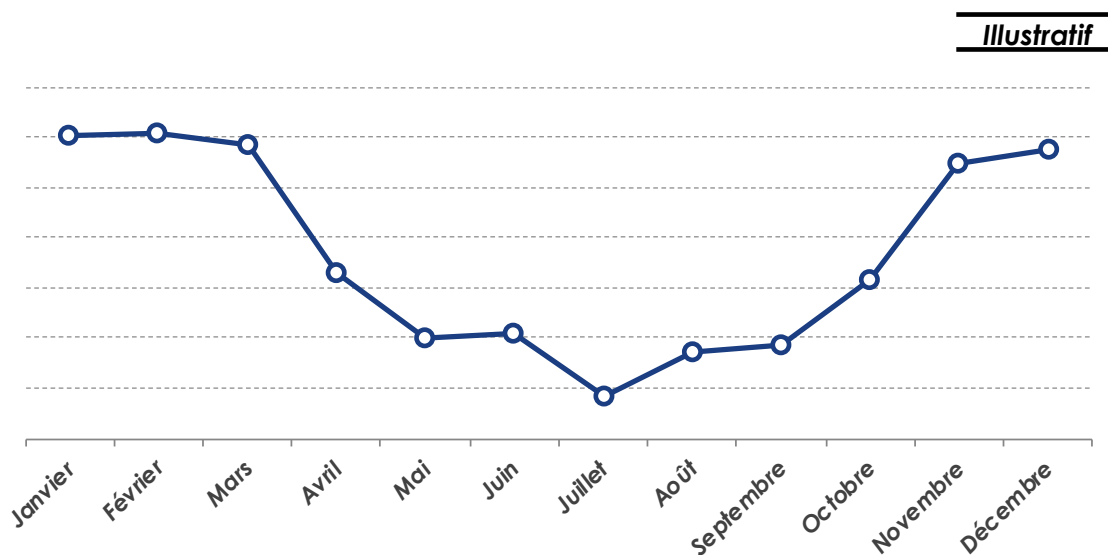


Source : Analyse Carbone 4 suivant les données eco2mix – RTE

En appliquant les différents facteurs d'émission des différents moyens de production, qui oscillent entre 6 gCO<sub>2</sub>e / kWh pour l'hydroélectrique et 1060 gCO<sub>2</sub>e / kWh pour le charbon, on obtient pour l'année 2019 un contenu carbone de l'électricité (avec les pertes réseau) de l'ordre de 37 gCO<sub>2</sub>e / kWh en été et de 87 gCO<sub>2</sub>e / kWh en hiver.

Comme évoqué précédemment le chauffage est un usage fortement saisonnalisé, son contenu carbone devrait donc se retrouver dans la fourchette haute des contenus carbone mensualisés. Le graphique ci-dessous illustre le profil annuel de la consommation de chauffage en France.

### Exemple de profil de consommation du chauffage électrique



Source : Analyse Carbone 4

En faisant une moyenne pondérée de cette consommation de chauffage et du contenu carbone de l'électricité, on obtient le contenu carbone du chauffage selon la méthode mensualisée.

$$\text{Contenu CO}_2\text{e chauffage} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{consommation mensuelle chauffage} * \text{contenu carbone mensuel}}{\sum_{i=1}^n \text{consommation mensuelle chauffage}}$$

Carbone 4 estime ce contenu carbone du chauffage électrique aux alentours de 70 gCO<sub>2</sub>e / kWh [1].

D'après différents travaux menés par l'ADEME en 2015 le contenu carbone du chauffage électrique selon la méthode mensualisée serait proche de 80 gCO<sub>2</sub>e / kWh soit une différence de près de 60% avec le résultat de la méthode saisonnalisée par usage. Cette différence s'explique au premier ordre par la différence des moyens de production alloués à l'usage chauffage et donc des conventions et hypothèses déterminées en amont

[1] Ce résultat n'est en aucun cas officiel mais provient d'une estimation faite par Carbone 4 sur la base des données de production de RTE de 2016 à 2019, des facteurs d'émission de l'ADEME pour les différents moyens de production et de travaux internes pour déterminer un profil annuel de la consommation de chauffage en France.

### 3.2.2 Commentaires

D'après la Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP) cette méthode a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, transparente, objective, de respecter le critère d'additivité et enfin de bien refléter la saisonnalité des usages. En effet, la prise en compte de la saisonnalité est moins binaire qu'avec la méthode dite saisonnalisée, de ce fait la corrélation temporelle est plus pertinente.

Le seul inconvénient identifié semble être que le pas mensuel ne permette pas d'intégrer la flexibilité des moyens de chauffage, ce qui engendre potentiellement une légère surestimation du contenu carbone. La méthode dite "horaire", dont la méthodologie est identique excepté le pas de temps, permet de corriger ce biais mais apporte de la complexité pour des résultats sensiblement proches. En effet, le 80 gCO<sub>2</sub>e / kWh évoqué ci-dessus pour l'ADEME en mensualisé se transforme en 79 gCO<sub>2</sub>e / kWh si le pas horaire est utilisé.



# 4

## La méthode marginale : si on ajoute marginalement du chauffage électrique, quel moyen de production faut-il mobiliser ?

### 4.1 Méthodologie

#### 4.1.1 Mais qu'est-ce que l'intensité marginale plus précisément ?

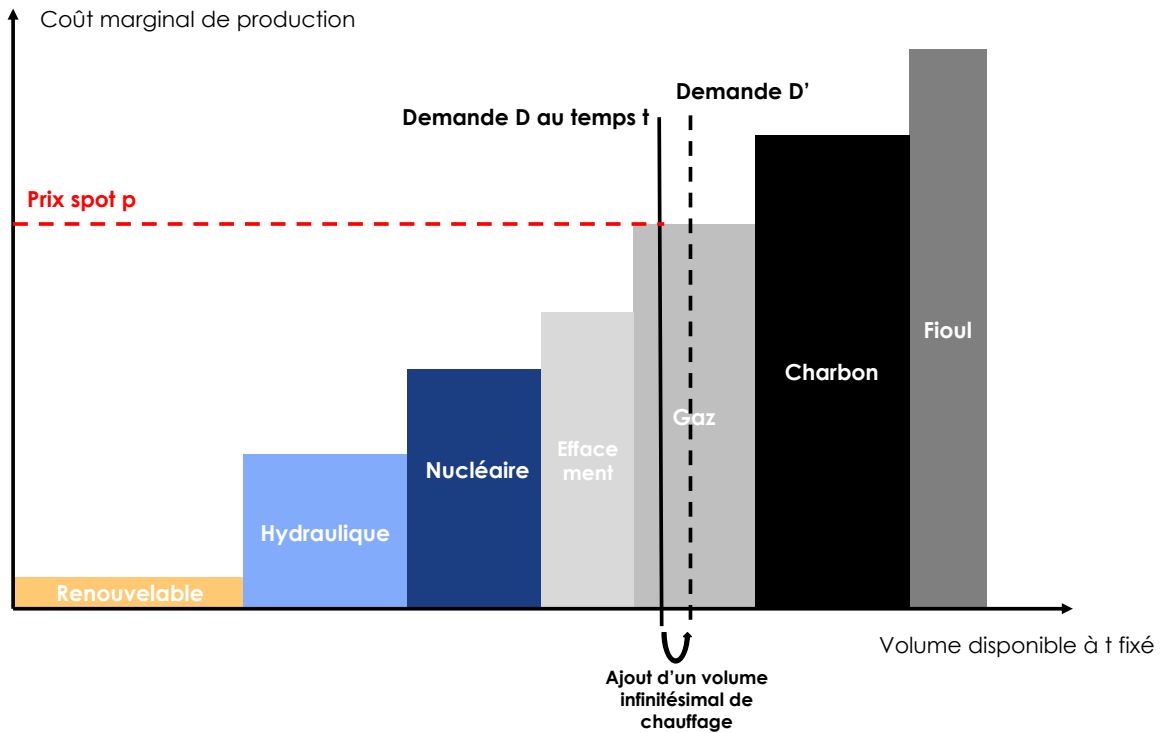
L'intensité marginale électrique correspond au facteur d'émission électrique (exprimé en gCO<sub>2</sub>e/kWhelec) du dernier moyen de production appelé dans une logique de *merit order*. Le *merit order* est le classement à un temps *t* des moyens de production. Il dépend des coûts de production marginaux et des volumes productibles de chaque centrale. Il permet de comprendre les échanges effectués sur le marché de gros [1] et de définir ainsi les moyens de production mobilisés à ce temps *t*.

#### 4.1.2 Comment fonctionne le marché de gros de l'électricité ?

Chaque jour des volumes d'électricité sont proposés sur le marché de gros, avec d'un côté les producteurs qui vendent un volume et de l'autre les fournisseurs d'électricité et grands industriels qui achètent ces volumes. Les échanges se réalisant sur le marché spot européen ont lieu 24h avant la livraison des volumes et s'effectuent au pas horaire. Ces échanges vont dépendre des coûts marginaux des moyens de productions et de facteurs spéculatifs propres à chaque acteur. Ainsi, certains moyens de production vont pouvoir vendre leur production tandis que d'autres ne le pourront pas. On s'intéresse alors au dernier moyen de production qui sera appelé, autrement dit au « Price maker » (celui qui fixe le prix de marché). Une fois ce moyen de production connu, on peut considérer que l'ajout d'un volume infinitésimal de chauffage à la demande sera équilibré par une activation de ce même moyen marginal.

[1] Marché de gros : Le marché de gros désigne le marché où l'électricité et le gaz sont négociés (achetés et vendus) avant d'être livrés sur le réseau à destination des clients finals (particuliers ou entreprises). Les acteurs de ce marché sont : les producteurs, les fournisseurs, les négociants et les opérateurs d'effacement.

### Exemple d'un merit order à un instant t fixé



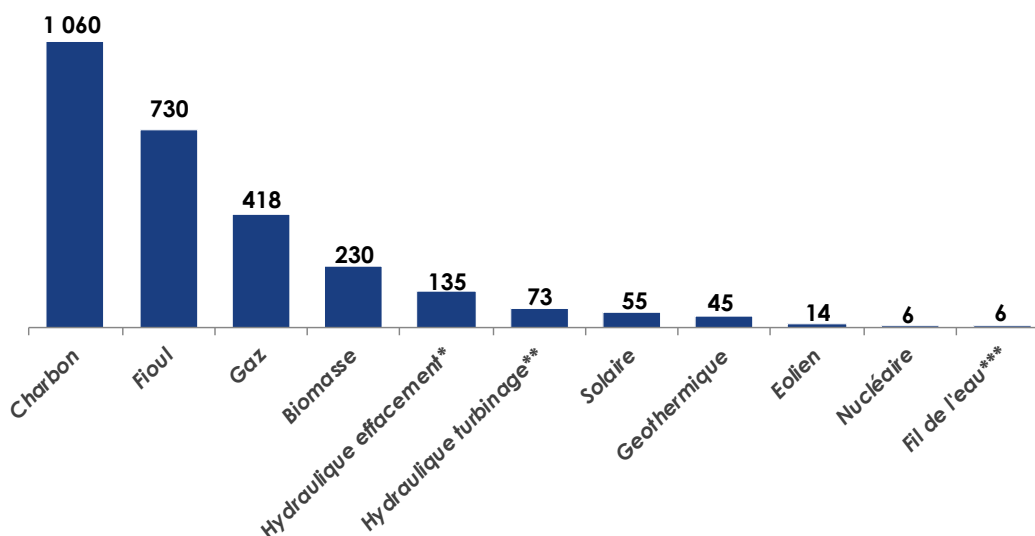
L'exemple ci-dessus prend la situation où le gaz est le dernier moyen appelé afin de répondre à la demande D au temps t (fixant ainsi le prix du marché p d'où « price maker »).

Le gaz est donc le moyen marginal à l'instant t. Une augmentation infinitésimale de la demande dû à l'allumage de chauffage électrique fera passer la demande D à une demande D' et sera équilibrée par une production supplémentaire de ce moyen marginal, à savoir la centrale à gaz. Le facteur d'émission marginal sera alors celui de cette centrale.

La reconstitution d'un merit order au pas horaire est un exercice complexe et incertain car il faut prendre en compte les coûts marginaux, les volumes encore disponibles à produire et le jeu spéculatif des acteurs sur le marché. La détermination de ce moyen marginal a été réalisée à partir de l'outil Electricity map qui utilise des algorithmes de machine learning pour déterminer les pourcentages de marginalité des moyens de production au pas horaire [1]. Ces algorithmes prennent en entrées les historiques de consommation, de production et les données météorologiques. Les facteurs d'émission de chaque moyen de production ont ensuite été utilisés afin de déterminer l'intensité carbone marginale horaire.

[1] Plus de détail sur la méthode cf. site web : <https://www.electricitymap.org/map>

**Facteur d'émissions des moyens de production électrique**  
(Unité : gCO<sub>2</sub>e/kWhelec, Source FE amont et combustion : ADEME)



\* *Hydraulique effacement* : Correspond à l'arrêt de pompage des Steps et est donc équivalent à de l'effacement, FE égale au FE marginal calculé à partir des moyens de productions restants.

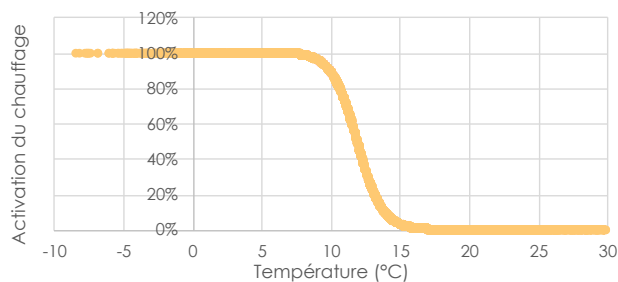
\*\* *Hydraulique turbinage* : Correspond au turbinage des STEPs, FE calculé sur le mix moyen des 24 heures précédentes.

\*\*\* *Fil de l'eau* : Sont considérées comme centrales au fil de l'eau les centrales ayant une réserve d'eau pouvant être turbinée en moins de 2h.

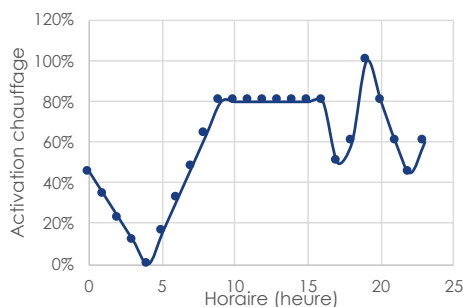
### 4.1.3 Quelles sont les périodes d'activation du chauffage en 2017/2018 ?

Afin de reconstituer les profils de chauffage sur les années 2017/2018, nous sommes repartis des historiques de températures [1]. Deux facteurs jouent sur l'activation du chauffage : une dépendance à la température horaire (la thermosensibilité) et une dépendance au moment de la journée (la tempo-sensibilité). La courbe de thermo-sensibilité suit une sigmoïde tandis que la tempo-sensibilité suit le profil de consommation électrique « classique » d'un ménage français.

**Thermosensibilité**  
(Profil chauffage « classique »)



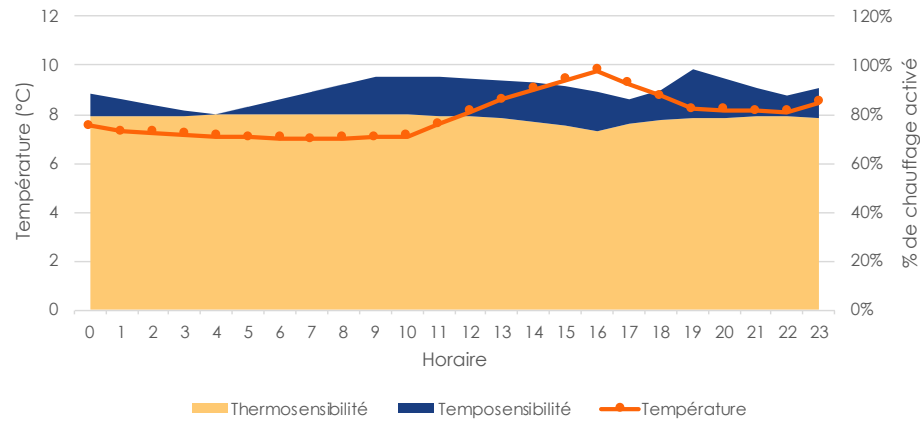
**Tempo-sensibilité**



[1] Données SYNOP Météo France

Selon les données RTE [1], la thermosensibilité compte pour environ 80% tandis que la tempo-sensibilité joue sur les 20% restants. Le graphique ci-dessous est un exemple d'une journée d'hiver mettant en exergue l'impact de chaque levier en fonction du moment de la journée et de la température.

**Contribution des leviers de sensibilité au cours d'une journée d'hiver**  
(Profil chauffage « classique », 20/12/2018)

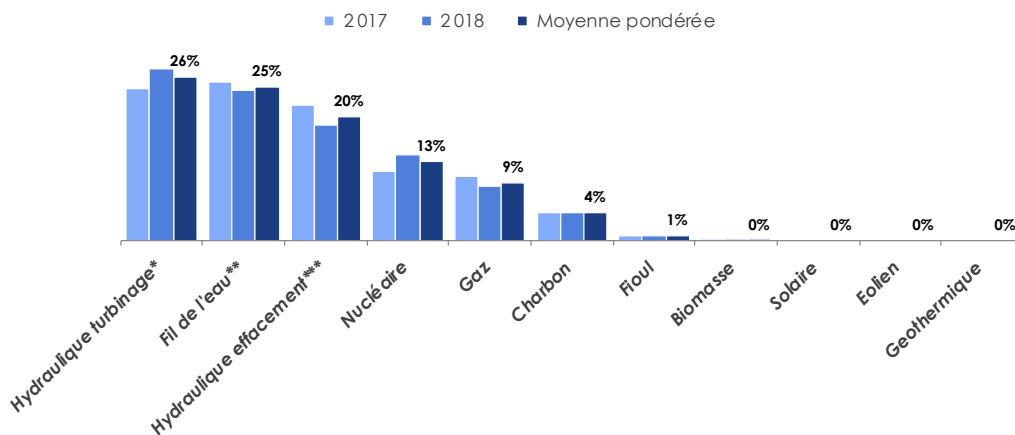


Ces deux facteurs ayant été mis en place, différents scénarios ont été construits mettant en jeu des seuils d'activation de chauffage différents. Pour la suite des résultats, le profil chauffage « classique » a été sélectionné. Le détail des scénarios et les résultats associés sont détaillés dans la partie « Analyse de sensibilité ».

## 4.2 Résultats

Pour un profil de chauffage classique sur les années 2017 et 2018, la marginalité des moyens de production est la suivante :

**Marginalité des moyens de production**  
(Profil chauffage « classique »)



\* Hydraulique turbinage : Correspond au turbinage des STEP, FE calculé sur le mix moyen des 24 heures précédentes.

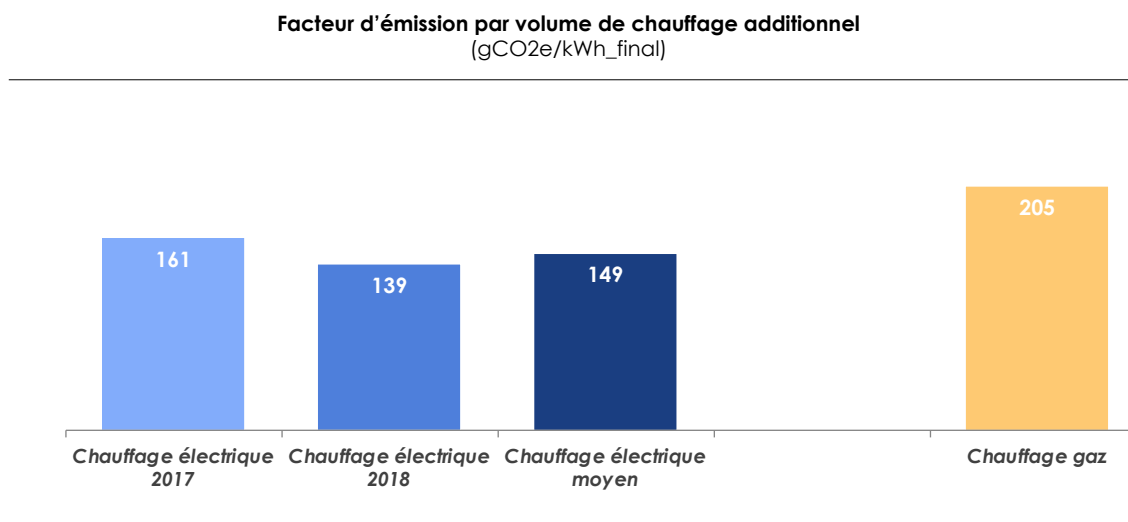
\*\* Fil de l'eau : Sont considérées comme centrales au fil de l'eau les centrales ayant une réserve d'eau pouvant être turbinée en moins de 2h. La puissance de leur production peut être modulée de façon très flexible. De plus, la production est économiquement optimisée grâce à l'implantation successive de centrales au fil de l'eau sur un même cours d'eau avec la logique suivante : moins turbiner en amont quand le prix spot est faible pour optimiser le turbinage en aval quand le prix augmente.

\*\*\*Hydraulique effacement : Correspond à l'arrêt de pompage des STEP et est donc équivalent à de l'effacement, FE égale au FE marginal calculé à partir des moyens de productions restants.

Ainsi les moyens renouvelables comme le solaire, l'éolien ou le géothermique ne sont jamais marginaux. Ceci provient du fait que leurs coûts marginaux sont nuls. Ils sont ainsi mobilisés dès qu'ils ont un volume à vendre sur le marché, car ils sont prêts à vendre leur production à des prix nuls (voire négatifs dans certains cas).

L'hydraulique est marginal à 25% pour le seul fil de l'eau, et dépasse les 50% lorsque l'on prend en compte les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP). Ces dernières ont un facteur d'émission bien plus élevée que celui du fil de l'eau (quasiment nul) puisqu'est associée à l'eau turbinée le facteur d'émission de l'électricité nécessaire pour pomper et donc élever cette eau. Ce facteur d'émission est calculé sur le mix moyen des 24h précédents le turbinage. Contrairement aux idées reçues, le charbon, gaz et fioul réunis atteignent difficilement les 15% de marginalité.

Le facteur d'émission ainsi obtenu est détaillé ci-dessous par année. Il est à comparer au facteur d'émission du chauffage au gaz qui correspond à la combustion et l'amont du gaz naturel utilisé dans des chaudières à condensation.



On voit que sur les deux années considérées, le facteur d'émission du chauffage électrique est 25% inférieur environ au facteur d'émission du chauffage au gaz.

Une comparaison en termes de chaleur utile creuserait cet écart à 30%. En effet, les systèmes de chauffages actuels ont des rendements proches des 90% pour les chaudières à condensation tandis que le chauffage électrique reste à un rendement de 100% : le volume final d'énergie nécessaire avec du chauffage au gaz est donc plus important pour un même kWh de chaleur utile.

Sans nécessairement conclure sur un chiffre précis, le calcul proposé a le mérite de mettre en avant un ordre de grandeur relativement proche pour l'impact carbone du chauffage électrique en marginal par rapport au chauffage au gaz.

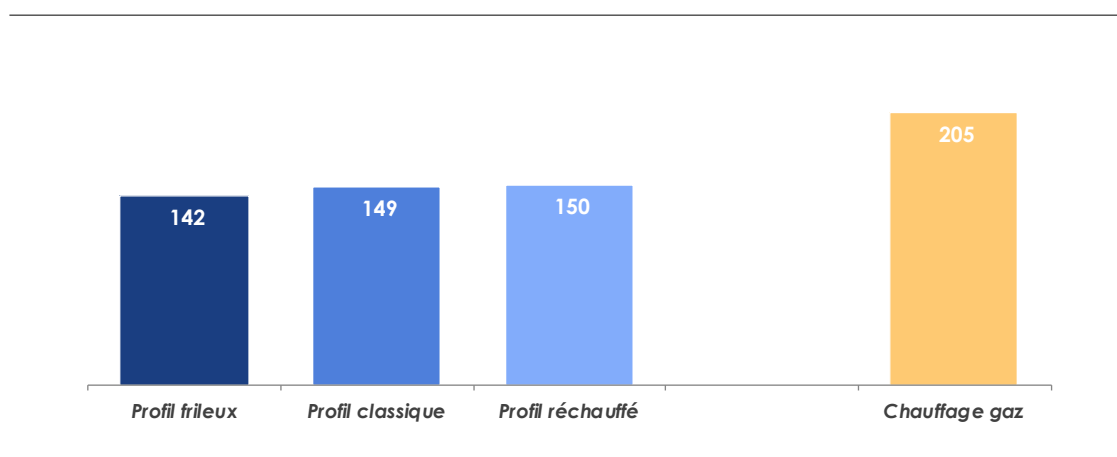
## Analyse de sensibilité

Comme évoqué précédemment, différents scénarios ont été construits afin de refléter divers profils de chauffage. Le tableau ci-dessous résume ces scénarios :

Activation du chauffage	0%	50%	90%	100%	
Température seuil °C	22	18	15	10	Profil frileux
	20	12	10	5	Profil classique
	18	10	6	3	Profil réchauffé

Par exemple, dans le profil frileux, 50% des personnes allument leur chauffage à 18°C. Les résultats finaux varient peu en fonction des profils sélectionnés comme le montre le graphique ci-dessous.

Facteur d'émission par volume de chauffage additionnel par scénario  
(gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>final</sub>)





# Conclusion.

## Synthèse des résultats pour l'usage chauffage

Méthode	Facteur d'émission chauffage (gCO <sub>2</sub> e/kWh)	Source
Saisonnalisée	147	ADEME
Mensualisée (Pas de temps = mois)	80 70	ADEME Analyse Carbone 4
Mensualisée (Pas de temps = heure)	79	ADEME
Marginale (Pas de temps = heure)	149	Analyse Carbone 4 sur données Electricity Map

Rappelons que le facteur d'émission du mix électrique moyen annuel est de 57 gCO<sub>2</sub>e/kWh pour 2018. On observe ainsi que **toutes ces méthodes retranscrivent le fait que l'électricité est plus carbonée lors du chauffage** (valeurs toutes supérieures à 57).

Ces facteurs d'émission sont à comparer au bois (30 gCO<sub>2</sub>e/kWh PCI), au réseau de chaleur (100 gCO<sub>2</sub>e/kWh PCS - moyenne FR) et au gaz naturel (205 gCO<sub>2</sub>e/kWh PCS) qui répondent également à l'usage chauffage. **L'électricité se trouve ainsi au milieu de la fourchette : moins carboné que le gaz naturel mais plus que le bois.**

Gardons aussi en tête que les valeurs affichées correspondent au radiateur électrique classique. **Pour une pompe à chaleur**, vous pouvez diviser toutes ces valeurs par 3 ; ce qui implique **une performance quasi équivalente au bois pour l'électricité.**

Quant à savoir quelle méthode utiliser, elles **correspondent toutes à des calculs théoriques, avec leurs conventions et leurs biais :**

- Les méthodes **saisonnalisées** et **mensualisées** reflètent une attribution statique sur le total des consommations d'une année passée ; ce qui permet de **raisonner en ordre de grandeur sur les responsabilités de chaque usage**
- La méthode **marginale** calcule une probabilité d'appeler tel moyen de production pour une demande supplémentaire, à partir d'un point de départ fixe historique ; ce qui permet une **évaluation plus dynamique**

**Quantifier l'impact climatique du chauffage électrique à long terme** doit néanmoins englober beaucoup plus de composantes :

- Massification des **rénovations thermiques** dans le résidentiel-tertiaire réduisant le besoin en chauffage
- **Pénétration des pompes à chaleur** plus efficaces énergétiquement
- Evolution des **prix des énergies**
- Changements des **comportements de chauffage** (e.g. se chauffer à 19°C pour des raisons de sobriété ou des raisons économiques)
- Réchauffement climatique conduisant à des **hivers moins rigoureux**
- Transformation du **mix de production**

En se projetant avec la **SNBC**, les **consommations électriques dans le résidentiel-tertiaire diminuent à l'horizon 2050, malgré l'électrification du chauffage [1]. A ce titre, la demande en chauffage électrique sera moindre et libérera des capacités pilotables de production.**

**Pour des raisons climatiques**, la SNBC prévoit ainsi une **augmentation du chauffage électrique** (radiateurs et pompes à chaleur), des **réseaux de chaleur** à partir de biomasse et une **diminution de la part du gaz.**



**Carbone 4** est le premier cabinet de conseil indépendant spécialisé dans la stratégie bas carbone et l'adaptation au changement climatique.

En permanence à l'écoute des signaux faibles, nous déployons une vision systémique de la contrainte énergie-climat, et mettons toute notre rigueur et notre créativité en œuvre pour transformer nos clients en leaders du défi climatique.

Contact: [alexandre.joly@carbone4.com](mailto:alexandre.joly@carbone4.com)

[1] <http://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2019/11/Publication-Carbone-4-Pointe-Electrique.pdf> ; p24