

Contenu CO₂ du chauffage électrique en France

Benjamin Haas*, Florence Khayat*, Isabelle Moretti**

@ 99170

Mots-clés : contenu CO₂, climat, chauffage, électricité, méthodologies de calcul

De nombreuses discussions sont en cours autour de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le cadre notamment de la future réglementation environnementale de 2020. Afin de mesurer l'impact des consommations énergétiques en matière d'effet de serre, il est d'usage de recourir aux contenus CO_{2éq} qui reflètent la quantité de GES émise par la consommation d'un kWh d'énergie. Plusieurs méthodes de calcul du contenu CO_{2éq} existent répondant à différents objectifs bien distincts. L'objectif de cet article est de présenter ces différentes méthodes et d'en faire une analyse.

Le secteur du bâtiment représente 44 % [2] de l'énergie consommée en France, loin devant le secteur des transports (31,3 %). Chaque année, le secteur du bâtiment émet plus de 123 millions de tonnes de CO_{2éq}¹ soit près du quart des émissions nationales, ce qui en fait l'un des domaines clés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique.

Afin de réduire ces émissions de gaz à effet de serre, la première étape est de pouvoir les comptabiliser. Pour cela, un indicateur est nécessaire : si le calcul du contenu CO_{2éq} est aisé pour les énergies fossiles et découle directement des équations de combustion, celui du kilowattheure électrique qui correspond aux émissions de CO_{2éq} engendrées par la consommation d'un kilowattheure d'électricité est sujet à discussion, voyons pourquoi.

Le contenu CO₂ est-il le même pour tous les kilowattheures électriques consommés en France ? Comment le calcule-t-on ?

Ce calcul est complexe pour l'électricité, celle-ci n'étant pas une énergie primaire, mais un vecteur énergétique, c'est-à-dire un moyen de transporter l'énergie : elle n'émet pas de gaz à effet de serre (GES) au moment de sa consommation, mais lors de sa production. À un instant donné, le kilowattheure (kWh) consommé sur le territoire national est issu d'un mélange des différentes sources d'énergie appelées pour le produire. Le contenu en CO_{2éq} du kWh électrique correspond aux émissions de CO_{2éq} engendrées par la production de ce kWh d'électricité. Ainsi, pour connaître les émissions liées à la consommation d'un appareil électrique, il faut s'interroger sur la façon dont le système électrique répond à la demande correspondante et par quels moyens de production.

Les émissions de gaz à effet de serre dépendent des centrales appelées pour répondre

* ENGIE Lab CRIGEN.

** Académie des technologies (cf. biographies p. 79-80).

à la demande, et donc du mix de production à un instant donné.

Déterminer la relation exacte entre la consommation d'électricité et les émissions de CO_{2éq} correspondantes nécessite d'associer précisément un ensemble de moyens de production d'électricité à cette consommation. Les électrons circulant librement sur le réseau électrique, il est cependant impossible de connaître l'origine exacte du courant alimentant un usage électrique à un instant donné. En effet, si les moyens de production s'« empilent » selon un ordre de priorité (voir ci-dessous), les usages de l'électricité n'ont pas de priorité les uns par rapport aux autres. Par conséquent, comment évaluer les émissions de GES générées par un appareil électrique sachant que les moyens de production mobilisés varient à chaque instant pour répondre à la variabilité de la demande ?

L'évaluation des émissions de GES nécessite donc le recours à des méthodes d'allocation. Contrairement à une idée reçue, il n'existe pas une méthode unique et universelle, mais plusieurs méthodes complémentaires, chacune étant adaptée à un champ d'application bien précis.

Le choix de la méthode dépend des objectifs recherchés : la valeur retenue de contenu en CO_{2éq} ne sera pas la même selon que l'on souhaite établir un bilan global et moyen d'émission ou estimer l'impact d'une décision qui fait varier la consommation d'électricité (par exemple une action d'efficacité énergétique ou au contraire le développement d'un nouvel usage électrique).

Quelle méthode de calcul utiliser pour évaluer le contenu CO_{2éq} de l'électricité dans les deux cas suivants : **la réalisation d'une mesure globale d'émissions de gaz à effet de serre et l'établissement d'un plan d'action visant à réduire ces émissions ?**

Chaque question suppose de sélectionner la méthode d'allocation la plus pertinente :

Pour établir un bilan global, les méthodes de calcul moyen sont les plus adaptées

Considérant que la provenance d'un kWh électrique ne peut pas être précisément déterminée, le contenu carbone de l'électricité produite est obtenu en moyennant les émissions de gaz à effet de serre du parc de production sur la période considérée. Plusieurs variantes existent dans ces méthodes dites « moyennes ».

Les méthodes moyennes sont toutes fondées sur le principe simple de la division des émissions de gaz à effet de serre d'un parc de production électrique donné par l'ensemble de l'électricité produite. Le contenu moyen en CO_{2éq} du kWh électrique produit en France sur une année est donc relativement simple à calculer : il suffit de diviser le nombre de tonnes de gaz à effet de serre émises par le secteur électrique par le nombre de kWh produits, sans tenir compte des importations et exportations d'électricité. On obtient ainsi le contenu moyen sur l'année. Il était de 50 gCO_{2éq}/kWh en 2018 [3]. Cette valeur met en lumière le faible contenu en carbone de l'électricité produite en France, mais elle ne prend pas en compte les importations d'électricité de la France ni ses exportations vers ses voisins européens. Elle ne reflète donc pas le contenu en CO_{2éq} de l'électricité consommée en France, mais le contenu CO_{2éq} de l'électricité produite en France. Par ailleurs, ce contenu moyen ne tient pas compte de la variabilité du contenu en CO_{2éq} du kWh en fonction des saisons ou des heures de la journée. Cette valeur évolue pourtant en fonction du niveau de consommation de l'électricité et des usages considérés

(par exemple, un chauffage électrique fonctionnera le plus souvent en hiver, le calcul doit donc porter sur le contenu moyen de l'électricité nécessaire en hiver).

Il existe néanmoins d'autres méthodes moyennes distinguant les contenus CO_{2éq} en fonction des différents usages de l'électricité. L'une d'entre elles, la méthode dite «saisonnière» ou «saisonnalisée par usage», développée conjointement par l'ADEME et EDF en 2005 et révisée en 2012 [4], est connue pour être référencée dans la base Carbone de l'ADEME, et est jusqu'à maintenant utilisée pour le calcul du Diagnostic de Performance Énergétique (DPE), et pour la méthode E+C² préfigurant la future réglementation environnementale des bâtiments neufs (RE2020). Cette méthode tient compte du caractère saisonnier de chaque usage et décompose la consommation en une part en base, et une part saisonnière. Elle met en regard de ces usages la production elle aussi de base ou saisonnière. À un usage uniquement saisonnier est attribuée la production saisonnière (voir Figure 1). En toute généralité, les valeurs des contenus carbone de chaque usage sont calculées au prorata des pourcentages de base et de saisonnalité qui le caractérise. Cette méthode, bien qu'imparfaite, tient en partie compte de l'évolution sur l'année du mix de production. Suivant les années de référence et le traitement des importations et des exportations, les valeurs du contenu carbone du chauffage électrique ainsi calculées varient entre environ 150 gCO_{2éq}/kWh et 210 gCO_{2éq}/kWh :

- La valeur 150 gCO_{2éq}/kWh est la valeur du contenu CO_{2éq} du chauffage électrique pour 2018 dans la base Carbone de l'ADEME et correspond à une moyenne glissante sur les 4 années 2014-2015-2016-2017. Ces années se sont révélées être des années douces en termes de températures entraînant une consommation annuelle d'électricité modérée.
- La valeur 210 gCO_{2éq}/kWh a été calculée en 2016 dans le cadre du groupe de travail travaillant à l'élaboration de l'expérimentation E+C- en prévision de la future RE2020. Cette valeur est basée sur une année fictive 2016

reconstituée par l'ADEME qui s'est avérée donner des valeurs de consommations annuelles d'électricité plus élevées.

Cet écart de valeur pour cette donnée d'entrée explique donc qu'il y ait *in fine* un écart de valeur pour le contenu CO_{2éq} du chauffage électrique.

Dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie [5], la méthode de calcul du contenu carbone du chauffage électrique est modifiée au profit d'une méthode dite «mensualisée par usage» donnant une valeur de 79 gCO_{2éq}/kWh. 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. La méthode mensualisée par «usage», contrairement à sa dénomination, n'attribue cependant pas les émissions de gaz à effet de serre de la pointe aux usages responsables de celle-ci puisqu'elle dilue l'impact de la pointe dans la base : elle associe à un usage la totalité de la production concomitante de l'usage. Dans la Figure 1, ceci signifie que les émissions de gaz à effet de serre associées à la partie orange de la production sont associées à l'usage responsable de la pointe. Nous constatons bien que celle-ci ne met pas en valeur les moyens de production sollicités par la pointe, en proposant un contenu CO₂ de l'ordre de 80 gCO_{2éq}/kWh qui mélange moyens de pointe et de base. Autrement dit, elle ne rend pas compte de la pointe électrique saisonnière que crée le chauffage électrique, ce qui revient à négliger un point essentiel du mix électrique. Par ailleurs, cette méthode ne sera donc pas à même de prendre en compte la nouvelle pointe de la climatisation, de la production solaire (ou éolienne) et des systèmes flexibles.

À conserver une méthode moyenne «par usage», il serait plus juste de repartir de la méthode dite saisonnalisée par usage qui prend en compte la pointe électrique et de l'améliorer afin de rendre compte par exemple de la nature des importations/exportations

Contenu CO₂ du chauffage électrique en France

d'électricité, et du caractère contre-saisonnier de la production photovoltaïque.

Pour conclure, nous constatons que certaines méthodes moyennes permettent d'associer à un usage un parc de production qui lui est lié (la méthode saisonnalisée par usage), d'autres se contentant de moyenniser une production concomitante d'un usage et de l'attribuer entièrement à cet usage (méthode moyenne classique, méthode dite «mensualisée par usage»). Aucune de ces méthodes ne permet de répondre à une autre question, à savoir l'effet de la variation d'une consommation, à la hausse ou à la baisse, sur le parc de production électrique.

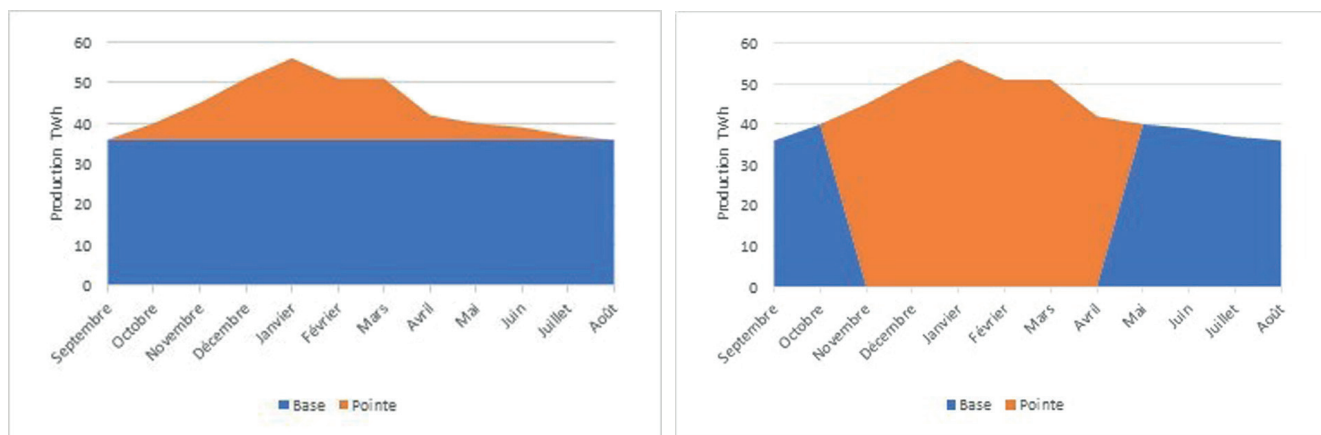
Les méthodes dites «marginales» permettent de traiter cette question : elles reposent sur l'analyse de l'effet d'une variation de consommation sur le parc de production électrique

Pour guider les décisions des politiques publiques, et bâtir des plans d'action pertinents visant à réduire les émissions de GES, l'objectif est d'orienter les choix d'investissements vers les solutions les moins émettrices de GES. Par conséquent, il faut retenir une méthode mettant en valeur l'impact futur de chacune des options envisagées (par exemple une hausse

ou une baisse de la demande) par rapport aux autres choix possibles sur le système électrique et ses émissions.

Pour ce faire, une compréhension du fonctionnement économique du parc de production électrique est nécessaire (voir l'article de Marcel Boiteux [1]). À chaque instant, la production d'une quantité d'électricité égale à la consommation est sollicitée auprès des moyens de production et des sources d'énergie disponibles à cet instant. L'ordre dans lequel les moyens de production sont sollicités est de nature technique (disponibilité effective, priorité aux énergies renouvelables dite fatales comme l'éolien, le photovoltaïque ou l'hydraulique au fil de l'eau) et économique. Ainsi, à chaque instant, les moyens de production non pilotables (comme le photovoltaïque et l'éolien) ou les moins chers sont prioritairement employés. Puis, au fur et à mesure de l'augmentation de la consommation, les centrales plus coûteuses (et généralement plus émettrices de GES) sont progressivement démarrées.

Ces centrales sont donc appelées suivant une logique économique visant à réduire le coût de production de l'électricité qui repose sur l'empilement des moyens de production par ordre de coût d'exploitation croissant³ :



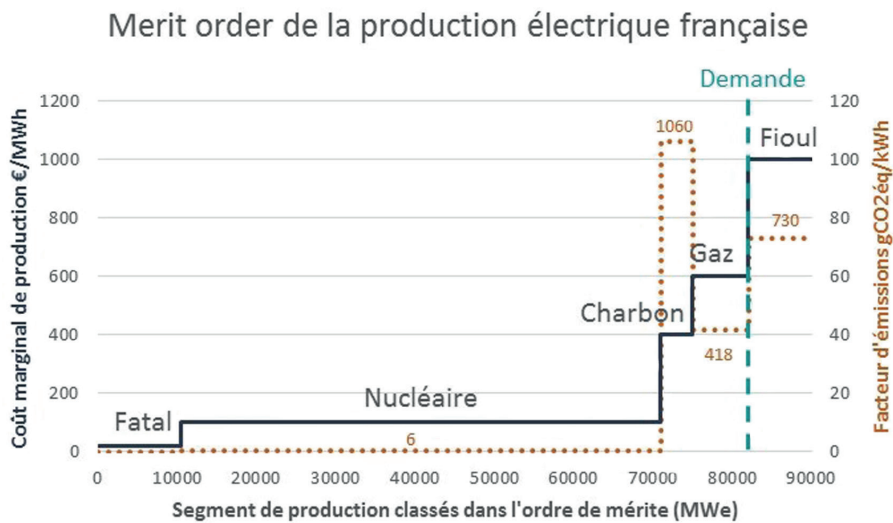


Figure 2. Ordre de mérite de la production électrique française actuelle [7] – 11 décembre 2013
 Où l'on constate que l'électricité la plus carbonée n'est pas (pour le moment?) la plus coûteuse.
 L'éolien et le solaire sont inclus dans la production fatale.

Source : éCO₂mix (RTE)

il s'agit du « *merit order* » basé sur les coûts marginaux de production [6].

L'électricité étant à ce jour difficilement stockable, l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité se doit d'être assuré en continu. Le *merit order* de production est ainsi établi à chaque instant pour répondre à la demande d'électricité. Pour optimiser le coût de production du kWh électrique, le gestionnaire du réseau sollicite les moyens de production par ordre de coût marginal croissant. Par analogie à cette notion de coût marginal, les méthodes marginales d'allocation des émissions de GES ont été développées pour évaluer les conséquences d'une action sur le fonctionnement du réseau électrique et de ses émissions de GES. Elles consistent à rechercher quel moyen de production d'électricité sera sollicité suite à une hausse ou une baisse de la demande d'électricité, afin de déterminer le contenu CO₂eq de cette consommation d'électricité marginale : c'est le calcul marginal le plus standard. À certains moments, une augmentation

de la consommation d'électricité n'entraînera que peu d'émissions supplémentaires de GES (par exemple la nuit en été, lorsque les centrales nucléaires ne sont pas toutes utilisées et donc partiellement disponibles). À l'inverse, au cours des périodes de pointe de consommation, les émissions de GES augmentent de manière considérable, car ces pointes nécessitent l'utilisation des centrales thermiques mises en service en dernier recours.

Le champ d'application des méthodes marginales est large, et concerne l'évaluation du contenu CO₂eq lié à toute décision d'investissement. Il peut s'agir, à la hausse, du contenu d'une consommation supplémentaire entraînée par un investissement (installation d'une climatisation, par exemple), ou du contenu évité par une action de maîtrise de la demande électrique (investissement dans une isolation, par exemple). Le contenu marginal peut également être appliqué pour les investissements dans les moyens de production électriques, par exemple les nouveaux investissements

Contenu CO₂ du chauffage électrique en France

| Usages | Contenu marginal en CO ₂ ^{élec} (en g de CO ₂ ^{élec} /kWh) |
|--|---|
| Chauffage électrique | 500 à 600 g |
| Usages intermittents et éclairage | 600 à 700 g |
| Usages «en base» (appareils de froid, eau chaude...) | 450 à 550 g |

Tableau 1. Contenu moyen en CO₂ par usage, selon la méthode marginale

Source : RTE/ADEME

dans des éoliennes ou du photovoltaïque. En effet, de telles productions électriques nouvelles ont le même effet qu'une diminution de la consommation sur le parc de production. Elle revient à moins solliciter le parc déjà installé, cet ajustement s'opérant en premier sur le moyen de production dont le coût marginal court terme est le plus élevé. Les méthodes marginales permettent donc d'évaluer aussi bien les effets des variations de consommation que les effets d'une nouvelle production, aux pertes de transport et de distribution près. Ce raisonnement est résumé et illustré via des exemples par Marcel Boiteux dans son article «La vente au coût marginal» paru dans *La Revue de l'Énergie* et datant de 1956 [1].

L'ADEME et RTE ont réalisé en 2007 [8] une première analyse du contenu en CO₂^{élec} du kWh électrique avec une méthode marginale. Pour réaliser cette analyse, il est d'abord nécessaire de reconstituer le moyen de production marginal, heure par heure, pendant une année. Puis, en connaissant les heures moyennes de fonctionnement d'un type d'appareil donné (éclairage, chauffage ou plaque de cuisson par exemple), il est possible de déduire le moyen marginal qui sera sollicité par une hausse ou impacté par une baisse de consommation électrique de cet appareil.

Cette approche permet de mesurer l'évaluation des émissions de CO₂^{élec} engendrées par une variation de la consommation électrique, en fonction de son usage : cf. Tableau 1.

L'ADEME et RTE évaluent donc ce contenu entre 450 et 700 kgCO₂^{élec}/MWh, ce qui indique que, dans un périmètre interconnecté

où l'hydraulique, l'éolien et le nucléaire sont disponibles en quantité limitée, l'essentiel de l'ajustement marginal est réalisé par les moyens de production thermique à flamme. Ces valeurs élevées du contenu CO₂^{élec} marginal s'expliquent par le fait que pendant 75 % du temps un incrément de consommation est satisfait par des moyens de production thermiques situés en France ou hors de France (période de marginalité dite non nucléaire) comme rappelé dans l'étude ADEME/RTE datant de 2007. Les 25 % du temps restant, cette augmentation de consommation sera satisfaite par une augmentation de la production nucléaire essentiellement en creux de nuit et en week-end. Cette augmentation n'entraînera donc pas d'émissions de CO₂^{élec} supplémentaires. Le chauffage étant un usage dit de pointe, une hausse de consommation sur cet usage sera par conséquent satisfaite par des moyens de production thermiques fortement carbonés.

Ce contenu CO₂^{élec} marginal, réalisé sur une année, donne une vision «actuelle» des ajustements. Pour répondre à la demande supplémentaire ou pour éviter la consommation d'un kWh, les méthodes marginales ont recours soit à un moyen de production existant, soit à la construction d'une nouvelle centrale de production d'électricité.

- Pour permettre d'éclairer correctement les choix d'investissement de plus long terme, il est nécessaire d'y ajouter une vision prospective afin de tenir compte des évolutions futures du parc de production et de la demande d'électricité. Le Green House Gas Protocol [9], référence mondiale dans l'évaluation des émissions de GES, préconise la comparaison de

deux scénarios de demande à moyen ou long terme pour répondre à la question de l'impact d'un nouveau projet (méthode incrémentale) :

- Un scénario dit tendanciel, correspondant à l'évolution la plus probable de la demande d'électricité et des moyens de production. L'évolution prévisible des moyens de production tient compte à la fois des investissements liés à des engagements politiques (par exemple pour les EnR) et des choix nécessaires, sur base économique, pour assurer l'équilibre offre-demande (Figure 3).

- Un scénario s'appuyant sur le scénario tendanciel, mais incluant une action correspondant à une consommation supplémentaire ou évitée, dont on souhaite évaluer le contenu CO_{2écq}.

Le contenu CO_{2écq} associé à cette variation de la demande due à l'action dont on souhaite évaluer le contenu carbone correspond à la variation des émissions de gaz à effet de serre rapportée à la variation de la consommation correspondante.

Pour répondre à la demande supplémentaire ou évitée d'un kWh, la méthode a recours soit à un moyen de production existant, soit à la construction d'une nouvelle centrale de production d'électricité. Cette méthode est la plus

pertinente pour s'intéresser à l'influence d'une variation de consommation due à un choix d'investissement.

Le choix des scénarios d'évolution joue un rôle important dans les résultats obtenus et certains paramètres sont difficilement prévisibles à long terme (prix mondiaux des énergies, politiques énergétiques, croissance économique...).

Une étude basée sur la méthodologie prescrite par le GHG protocole a été réalisée par ENGIE en 2015. Cette dernière prenant en compte des scénarii prospectifs à horizon 2030 s'appuyant sur les données issues de RTE fait ressortir le contenu CO_{2écq} marginal autour de 400 gCO_{2écq}/kWh : la demande additionnelle est effectivement assurée par des moyens thermiques, soit en France soit dans les pays voisins.

Ces méthodes marginales de long terme (ou incrémentales) donnent les moyens d'apprécier plus finement l'impact d'une politique énergétique. Qu'engendrera une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments? Quelles seront les émissions de GES associées au développement d'un nouvel usage?

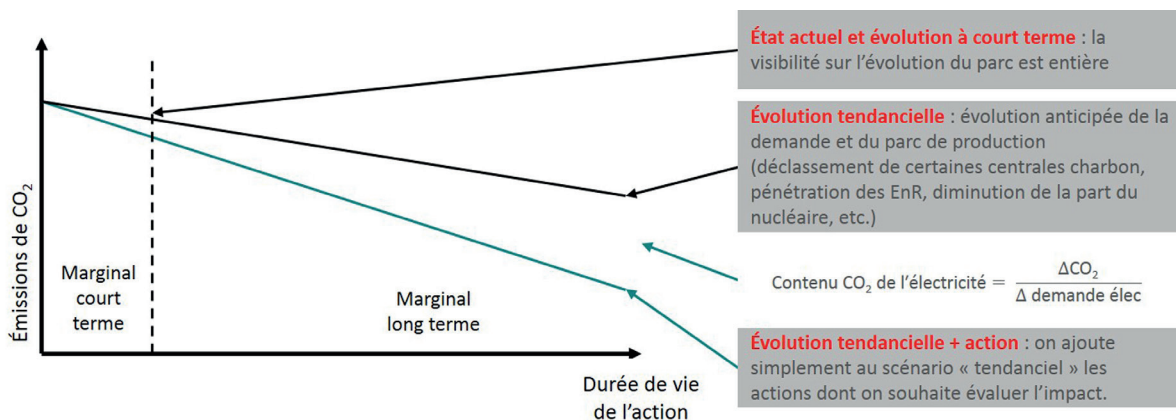


Figure 3. L'évolution tendancielle est constituée de la meilleure anticipation de la demande et des moyens

Contenu CO₂ du chauffage électrique en France

L'utilisation de la méthode adéquate est donc primordiale!

Il est tentant de rechercher une méthode unique : cela n'a malheureusement aucun sens, car chaque méthode n'est scientifiquement justifiée que par rapport à l'objectif poursuivi : cf. Tableau 2.

Il existe donc plusieurs méthodes pour estimer le contenu carbone d'un kWh de chauffage électrique avec des hypothèses et des conventions différentes pour chacune d'entre elles. Ainsi ce contenu CO_{2éq} peut varier selon la période d'analyse (annuelle, mensuelle, journalière, horaire), les usages analysés (tous usages, chauffage...) et le type d'analyse (moyen ou marginal).

Il n'est donc pas possible de faire l'économie d'une des méthodes sans se priver des informations utiles qu'elle apporte. Pour être pertinente, chacune doit donc être utilisée en fonction du contexte et du problème considéré. C'est ce que s'emploie à faire le projet de norme européenne prEN17423 en cours de rédaction et récemment approuvée : clarifier les objectifs et apporter de la transparence dans les hypothèses de calcul des contenus CO_{2éq}.

À l'heure de la transition énergétique, des questions se posent sur le chemin à emprunter pour conduire nos sociétés vers une plus grande sobriété énergétique et une réduction forte de notre impact environnemental. Les débats sont déjà nombreux notamment autour de la place des différents systèmes de chauffage, en particulier dans le résidentiel.

| | Type d'approche | | |
|--|--|--|---|
| | Moyenne | Marginale | Incrémentale (ou marginale de long terme) |
| Utilisation | Bilan des émissions à un moment donné | Conséquence des actions de MDE, de développement des usages ou de développement de petite production EnR | Conséquence d'un choix d'orientation énergétique en faveur de l'électricité |
| Méthodes disponibles | Saisonnière (ou saisonnalisée par usage) ADEME-EDF | Marginal ADEME-RTE | GHG protocol ; ENGIE |
| Domaine de validité | Valide par définition sur la période de calcul | Estimé à ±10 TWh par rapport à la situation initiale | Évolution long terme du parc électrique |
| Stabilité d'une année sur l'autre | Relativement stable – Soumise aux aléas (climatique, hydraulique...) | Très stable, se focalisant sur les moyens dispatchables disponibles | Instabilité liée aux conditions macroéconomiques |
| Limite | Ne permet pas de caractériser l'évolution des émissions | Sensible aux hypothèses d'interconnexion | Suppose une saturation du parc de production existant |
| Valeurs | Chauffage : 150 à 210 gCO _{2éq} /kWh | Chauffage : 500 à 600 gCO _{2éq} /kWh | Chauffage : 400 gCO _{2éq} /kWh |

Tableau 2. Synthèse des approches de calcul du contenu CO_{2éq}

Une analyse scientifique complète des émissions de GES remet en cause l'idée reçue du caractère peu émissif de l'électricité dans le cadre de nouveaux projets comme ceux de la construction neuve ou dans le cadre d'opérations de rénovation.

Notons que prendre une valeur de contenu CO_{2éq} calculée dans une approche moyenne prospective biaise le raisonnement puisque la méthode moyenne permet de faire le bilan d'une situation actée et donc sous-entend que les objectifs du scénario sont d'ores et déjà atteints. En donnant dès à présent une valeur basse des émissions et donc du contenu CO_{2éq}, les systèmes paraissent mécaniquement et artificiellement performants sans avoir fait le moindre effort. Cela va avoir pour effet de gonfler le développement des solutions électriques dans le neuf comme dans l'existant et donc d'augmenter les consommations d'électricité. Or ces consommations supplémentaires seront très probablement en hiver et fournies majoritairement par des centrales thermiques à flamme plus émettrices de GES. L'effet d'une réduction artificielle des émissions de GES sera donc inverse au but recherché. Il est nécessaire d'envoyer des signaux justes et adéquats via la valeur des contenus de CO_{2éq} de manière à ce qu'ils orientent les politiques énergétiques de façon à rendre le scénario prospectif de réduction de GES réalisable.

L'urgence et l'importance d'engager une transition énergétique pour réduire les impacts majeurs du changement climatique justifient sans aucune équivoque l'adoption des méthodes de mesures adéquates afin de garantir les meilleurs choix politiques. Dans le cadre de la RE2020, seule une approche marginale en prospectif fait sens pour la construction neuve, l'objet d'une telle réglementation étant le «bien prescrire», et bien prescrire se fait en évaluant l'impact de telle ou telle décision d'investissement.

RÉFÉRENCES

[1] M. Boiteux, «La vente au coût marginal», *La Revue de l'Énergie*, 1956.

[2] <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/energie-dans-batiments>.

[3] RTE. https://opendata.reseaux-energies.fr/explore/data-set/eco2mix-national-cons-def/analyze/?disjunctive.nature&sort=-date_heure&refine.date_heure=2018&dataChart=eyJxdWVyaWVzIjpbeyJjaGFydHMtOlt7InR5cGU0iJsaW50IiwiaWZnVuYyI6IkFWRYsInlBeGlzIjoidGF1eF9jbzIiLCJjb2.

[4] ADEME, «Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France», 2005.

[5] Programmation pluriannuelle de l'énergie.

[6] <http://www.energie.sia-partners.com/marche-de-lelectricite-et-prix-negatifs-ou-quand-le-consommateur-est-payepour-consommer>.

[7] «Quelle valeur pour le contenu CO₂ français?», [En ligne] https://conseils.xpair.com/actualite_experts/valeur-contenu-co2-electricite.htm.

[8] <https://www.agirpourenvironnement.org/pdf/contenu-CO2longue.pdf>.

[9] <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC27p39-45.pdf>.

NOTES

1. Il existe plusieurs gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO₂) étant le plus connu et le plus courant. Cependant d'autres gaz, naturels ou artificiels, ont le même effet, avec une action plus ou moins marquée. L'équivalent dioxyde de carbone (équivalent CO₂) est une mesure métrique utilisée pour comparer les émissions de divers gaz à effet de serre sur la base de leur potentiel de réchauffement global (PRG), en convertissant les quantités des divers gaz émis en la quantité équivalente de dioxyde de carbone ayant le même potentiel de réchauffement planétaire.
2. L'expérimentation E+C- (comme «énergie plus, carbone moins»), appelée également label énergie carbone et lancée en 2016, avait pour vocation d'expérimenter la future réglementation thermique RE2020. L'un des principaux apports de cette expérimentation a été d'intégrer à l'évaluation des bâtiments leur empreinte carbone.
3. Établi par Marcel Boiteux lors de la mise en place de la tarification de l'électricité en 1949.