

édito

La Lettre du Carbone N°1 est arrivée...

Quand on s'appelle Carbone 4, il arrive que l'on s'intéresse... au carbone. C'est donc avec plaisir que nous vous adressons le premier exemplaire de notre « Lettre du Carbone », qui, du moins c'est notre ambition, essaiera de vous exposer à intervalles parfaitement irréguliers nombre de pistes intéressantes - voire iconoclastes - que l'on peut suivre à partir de la comptabilité carbone.

Notre but, avec cette lettre, ne sera pas de vous convertir à la lutte contre la dépendance énergétique (entre la Libye et le Japon, l'actualité s'en charge pour le moment à notre place), ni de vous convaincre de contribuer à la préservation d'un climat stable (à tort ou à raison, nous le tiendrons pour acquis), mais de vous exposer mille et une actions, conclusions, réflexions, interrogations, et autres « ions » auxquelles il est possible de parvenir avec cette nouvelle boîte à outils qui s'appelle la comptabilité carbone.

Nous plaçant sur un terrain résolument opérationnel, nous essaierons donc de vous faire part d'expériences où le carbone s'est mis au service de la gestion, du commerce, du marketing, voire, soyons fous, du management ou de la stratégie, pour le plus grand bonheur - ou le plus grand malheur, parfois, car on apprend aussi beaucoup de ses échecs - des acteurs concernés. Nous essaierons aussi de vous proposer des informations simplement utiles ou intéressantes, sans certitude absolue que tout le monde en fera son miel.

En guise d'apéritif, le premier sujet que nous vous proposons

concerne les (presque) mille et une manières de compter le carbone de l'électricité. Entre le Grenelle et les interrogations relancées sur l'avenir du nucléaire, nous pouvons considérer que ce sujet est un peu dans l'air du temps.

Si ces quelques lignes suscitent questions, irritations, incompréhensions (ce que nous préfererons éviter, mais parfois la vie est tellement mal faite...), ou envies de prolongations, nous serons toujours ravis d'avoir vos retours ; sans trop nous cacher derrière notre petit doigt, cette lettre a aussi cet objectif !

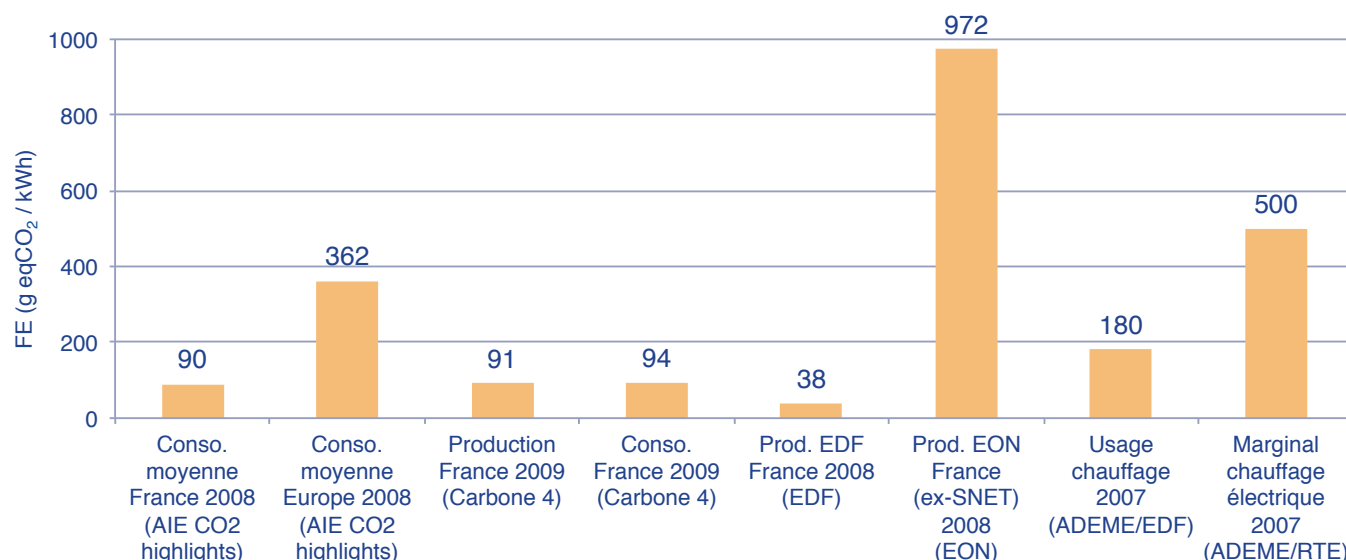
En vous proposant cette lettre, nous prenons un engagement solennel : celui de ne respecter aucune périodicité de parution particulière. Nous n'en produirons que sur des sujets sur lesquels nous pensons avoir un apport digne de vous être signalé. Il se pourrait donc qu'à certains moments, les sujets se bousculent au portillon, et que rien de bien fracassant ne nous passe par la tête à d'autres époques. Il nous arrivera aussi d'être tout simplement surchargés par nos chers clients...

Si, lecture faite de cet exemplaire inaugural, la première question qui vous vient à l'esprit est de savoir quand arrivera l'exemplaire suivant, nous pourrions considérer que nous avons bien mérité de la patrie. Et sinon, nous espérons que vous continuerez à nous parler quand même !

Nous vous souhaitons une très bonne lecture, et vous donnons déjà rendez-vous pour le numéro 2, qui arrivera donc... quand il voudra.

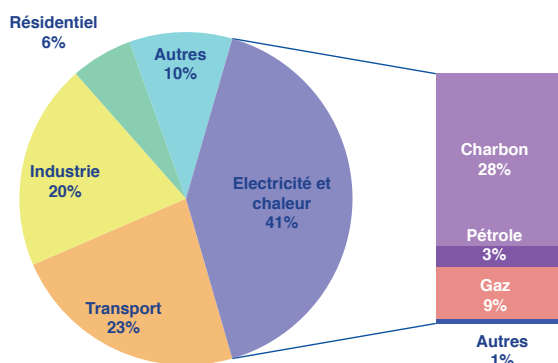
**Alain Grandjean et
Jean-Marc Jancovici
Associés fondateurs
de Carbone 4**

QUEL FACTEUR D'ÉMISSION POUR L'ÉLECTRICITÉ ?



Pourquoi s'intéresser au facteur d'émission de l'électricité ?

Les émissions de CO₂ liées à la production d'électricité représentent 40% des émissions mondiales de CO₂ fossile (Fig. 1). L'importance de ces émissions est principalement due à la part des énergies fossiles dans le mix électrique mondial. A lui seul, le charbon représente 70% des émissions mondiales de CO₂ de la production d'électricité. Le charbon pour l'électricité représente ainsi 25% des émissions mondiales de CO₂.



Emissions mondiales de CO₂ : 29 GtCO₂ (2007)

Figure 1 - Répartition des émissions mondiales de CO₂ fossile en 2007, avec détail sur la production d'électricité. Source AIE World Energy Outlook, 2009

En France le sujet semble souvent réglé par l'évocation de notre part de nucléaire et d'hydraulique dans le mix électrique. Mais, si notre mix est bien différent du mix mondial, les émissions de CO₂ de la production d'électricité représentent néanmoins près de 12% de nos émissions nationales de CO₂ (en 2008, sur un total d'émissions de CO₂ fossile de 391 MtCO₂ pour la France, la production d'électricité concourt pour 45 MtCO₂, soit 11,5% ; *Chiffres clés du climat France et Monde*¹). Charbon et gaz sont en effet utilisés pour compléter la production nucléaire et hydraulique (Fig. 2).

La production d'électricité constitue donc un enjeu majeur dans les politiques de réduction des émissions de CO₂, et cette conclusion reste pour partie valable en France.

De la production d'un kWh hydraulique (de l'ordre de 5 g CO₂/kWh en analyse de cycle de vie), à la production d'un kWh à partir de lignite (>1000 g CO₂/kWh en ACV), il existe une large palette de moyens de produire l'électricité.

La part des différents moyens de production dans le mix va déterminer le facteur d'émission de l'électricité produite, soit la quantité de gaz à effet de serre émise dans le processus complet de production d'électricité, FE dans la suite.

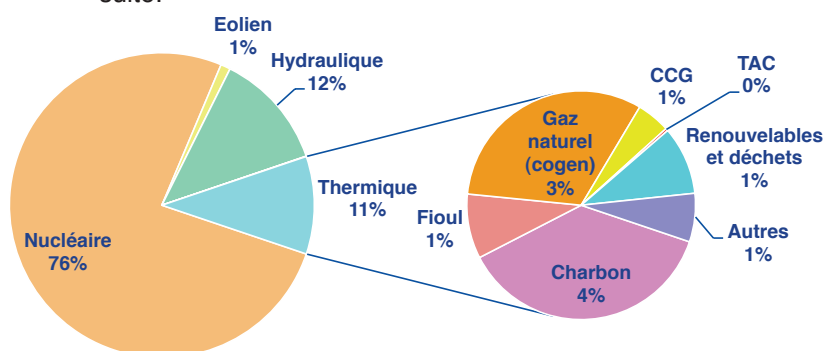


Figure 2 - Le mix de production français (2008)

¹ Chiffres clés du climat France et Monde, Edition 2011, Commissariat général au développement durable – SOeS

Toute demande d'électricité va nécessiter la mise en œuvre de moyens de production avec des facteurs d'émissions différents, dont une partie sera située en dehors des frontières. Le facteur d'émission de cette électricité consommée sera alors calculé en reconstituant la part supposée des différents moyens de production mis en œuvre pour fournir la demande.

L'objet de cette note est de présenter les différents moyens de comptabiliser les émissions de CO₂ de l'électricité. Les résultats seront donnés pour la France, mais ces méthodes sont cependant tout à fait exportables aux autres pays.

Dans cette étude, nous n'intégrons pas les émissions liées au transport et à la distribution d'électricité qu'il faudrait ajouter à tous les FE proposés ici, si nous souhaitions obtenir le FE de l'électricité « à la prise ». Pour l'électricité basse tension en France, cela ajoute de l'ordre de 8% aux émissions de la production.

“Il n’y pas un facteur d’émission, mais plusieurs facteurs d’émission de l’électricité”

Facteur d'émission moyen de la production

Le premier facteur d'émission (FE) qu'il semble naturel de proposer est le FE moyen de l'ensemble de l'électricité produite en France sur un pas de temps donné.

La méthode est assez simple, il s'agit de compter les émissions de CO₂ associées à la production d'électricité pendant la période considérée par les différents moyens qui composent le mix français. On divise ensuite les émissions obtenues par le nombre de kWh produits au cours de la même période, qui sera le plus souvent une année civile ou un mois.

Les FE des différents moyens de production sont obtenus par des analyses de cycles de vie, afin de tenir compte de l'ensemble des émissions (combustion + émissions associées à la production et au transport du combustible)², et pourront faire l'objet d'ajustements selon l'évolution des technologies.

Ce facteur d'émission calculé pour la France en 2009 donne 91 gCO₂/kWh, et la figure 4 propose le calcul pour chacune des trois dernières années (fig. 4). Ce FE est très proche de celui proposé annuellement par l'Agence Internationale de l'Energie, qui correspond à la comptabilisation des émissions de CO₂ liées à la combustion des énergies pour produire électricité et chaleur. NB : l'AIE ne tient pas compte de la construction des moyens de production, ou des émissions accessoires

comme celles du fret ou de la gestion des déchets ou effluents. Le FE de l'AIE est utilisé dans de nombreuses études ou méthodologies, et c'est par exemple un des FE utilisés dans la méthode Bilan Carbone de l'ADEME.

Afin de refléter l'aspect saisonnier de la demande et donc de la production électrique, ce FE peut être calculé également de façon mensuelle (Fig. 3), voire jour par jour ou même heure par heure, en fonction des moyens de production sollicités. RTE publie aujourd'hui ce travail sur son site Internet³.

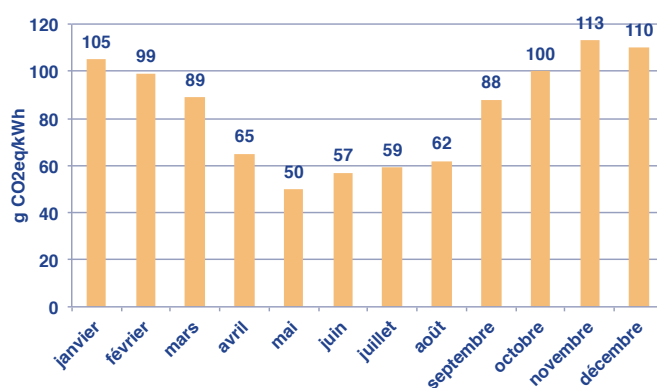


Figure 3 - FE moyen mensuel de la production (2009), calculs Carbone 4, source RTE

Le calcul du FE de la production est intéressant pour faire l'inventaire des émissions de CO₂ liées à la production d'électricité en France. Mais s'il s'agit d'évaluer les émissions de CO₂ associées à la consommation d'un kWh par un usager en France, ce calcul sera parfois insatisfaisant.

Facteur d'émission moyen de la production corrigé des imports/exports

Nous avons en permanence des échanges d'électricité avec nos voisins européens, et pour obtenir les émissions de CO₂ de l'électricité consommée en France, il faut tenir compte de ces connexions aux frontières. En pratique, en partant de la production française, nous allons enlever l'électricité exportée, et ajouter l'électricité que nous importons.

Nos imports sont généralement liés à un besoin de puissance électrique dans les périodes de pointe. Lors d'un import, la sollicitation de nos connexions aux frontières signifie donc que nous utilisons un moyen de production à l'étranger. Or le facteur d'émission de ce moyen n'a aucune raison de correspondre à celui de la moyenne du parc français.

² Facteur d'émissions des différentes filières de production EDF : http://fr.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Edf_en_france/documents/Profil_environ_kwh_EDF_2010.pdf

³ <http://www.rte-france.com/fr/developpement-durable/maitriser-sa-consommation-electrique/consommation-production-et-contenu-co2-de-l-electricite-francaise#emissionCO2>

Il est cependant difficile voire impossible de tracer l'électricité importée que nous consommons, c'est-à-dire la relier à la mise en route d'une centrale donnée dans un pays donné. Par ailleurs il faut éviter de compter avec un facteur d'émission différent l'entrée et la sortie d'une électricité qui ne fait que passer par chez nous (par exemple à l'occasion d'un appel fait par l'Italie à l'Allemagne) mais ne participe pas à notre consommation. Pour tenir compte de tous ces effets, nous avons retenu comme méthode la prise en compte des imports et exports nets heure par heure (données RTE). Les heures où notre solde d'échange est négatif, nous affectons l'électricité nette importée d'un facteur d'émission qui est calculé à partir des FE moyens de production de chacun des pays auxquels nous importons. Le calcul du FE des importations nettes nous donne par exemple en 2008, une valeur de 541 g CO₂/kWh (cette valeur élevée est principalement due à la part importante des importations venant d'Allemagne).

Dans cette approche, nous retranchons également les émissions associées à l'électricité exportée, qui est affectée du facteur d'émission moyen (sur l'année) de la production française.

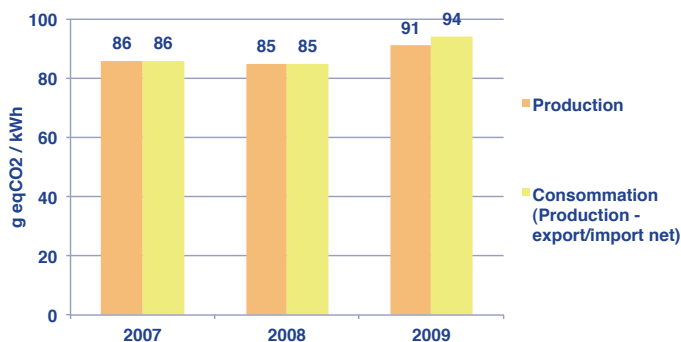


Figure 4 - Facteur d'émission du kWh électrique produit et consommé en France

Redisons que ce FE de la consommation (comme tous les FE proposés ici) n'intègre pas les émissions liées au transport et à la distribution d'électricité qu'il conviendrait de rajouter à tous les FE proposés ici, si nous souhaitions obtenir le FE de l'électricité « à la prise » (de l'ordre de 8% pour l'électricité basse tension en France).

FE producteur / fournisseur

Le marché de l'électricité en France permet aujourd'hui aux consommateurs de choisir leur fournisseur d'électricité (qui peut être producteur ou non), ou d'acheter directement sur le marché de gros auprès d'un producteur (pour les gros consommateurs).

Dans les faits, il est difficile de lier la consommation d'un kWh d'électricité à un moyen de production particulier,

car l'équilibrage du réseau électrique est fait au niveau national (voire européen), les électrons circulent sur le réseau indépendamment des contrats.

En revanche, il peut être intéressant de créer une incitation vers les consommateurs à se tourner vers un fournisseur moins carboné pour développer ce type de production électrique. Et pour ce faire, de calculer un FE fournisseur qui reflète le mix de production (ou le mix d'achat dans le cas où ce fournisseur ne dispose pas de moyen de production) de l'électricité qu'il vend.

Les producteurs d'électricité sont en mesure de comptabiliser précisément leurs émissions directes (notamment à cause de la directive quotas). Un client peut alors demander à son fournisseur les émissions associées à la production de l'électricité qu'il lui vend et en déduire un facteur d'émission qui lui est applicable. Depuis 2001, PwC avec Enerpresse publie une étude qui quantifie et compare les émissions de gaz à effet de serre des 23 plus grands producteurs d'électricité européens⁴.

Par exemple, si vous vous fournissez uniquement chez EDF France, vous pourrez utiliser le facteur d'émission de l'électricité produite par EDF France (qui est différent du facteur d'émission moyen de l'électricité produite en France, parce que EDF France n'est pas le seul producteur d'électricité en France). Ce dernier est publié de façon mensuelle et annuelle, sur la base du mix de production d'EDF mis en œuvre sur la période étudiée (FE EDF France 2010 : 45 gCO₂eq/kWh).

Si le fournisseur vend une électricité qui vient de ses propres installations, le calcul est simple, et son facteur d'émission est celui de son mix de production sur la période considérée. S'il n'est que distributeur, alors il lui faudra faire une moyenne en utilisant les facteurs d'émissions « producteur » des divers producteurs auxquels il fait appel, au prorata des achats. Si le fournisseur achète sur le marché à des intermédiaires, l'électricité sera alors difficilement traçable et cette méthode n'est plus applicable.

FE horo-saisonnier

L'utilisation d'un FE moyen, comme présenté précédemment, même corrigé des imports/exports, n'est dans certains cas pas adaptée à la question posée.

Par exemple, imaginons que nous souhaitions calculer les émissions évitées par un effacement de consommation en jour de pointe (un effacement de consommation est une action qui permet de ne pas consommer d'électricité à ce moment là - elle peut éventuellement être simplement décalée). En pratique, cet effacement a permis d'éviter les émissions associées aux moyens de production mis en œuvre au moment de la pointe. Si nous utilisons le FE moyen de la production française, même mensuel, il sera basé sur des moyens de production qui ne sont pas

⁴ Facteur carbone européen – comparaison des émissions de CO₂ des principaux électriciens européens, Enerpresse PWC, nov 2010

ceux utilisés pour la pointe. Les émissions de CO₂ évitées seront alors sous-évaluées, et ne refléteront pas l'intérêt « carbone » de l'effacement au moment le plus critique (heure de pointe en hiver).

Afin de traduire la mise en œuvre de moyens de production qui dépendent du niveau de la puissance appelée sur le réseau, nous allons découper l'année en tranches horaires, chaque tranche étant caractérisée par sa durée (en heures concernées) et la puissance moyenne injectée sur le réseau pendant cette durée. Cette méthode est souvent utilisée par les producteurs d'électricité pour des analyses ; on parle parfois de « monotone de puissance » (Fig. 5 – découpage proposé par l'UFE).

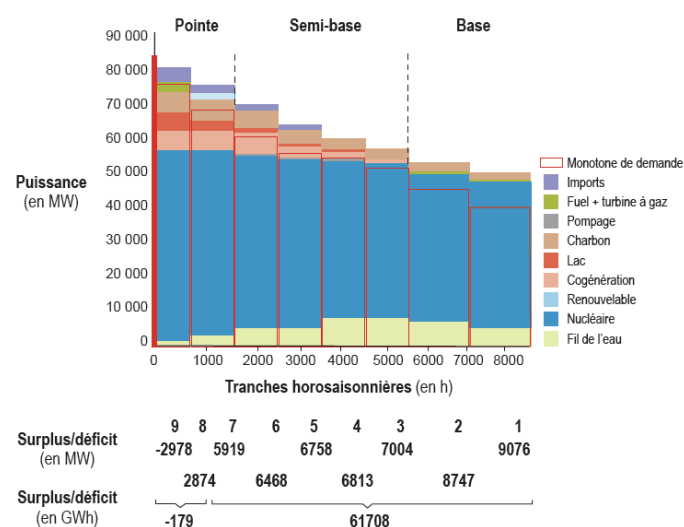


Figure 5 - Défis climatiques et nouveaux enjeux électriques, UFE, février 2009

Sur le graphique ci-dessus, l'ensemble de l'année est découpé en 9 tranches (qui vont de 60h à 1500 h ; attention la tranche de 60 h, tout à gauche, est difficile à visualiser) représentant les 8760 heures de l'année, et pour chacune des tranches figure la puissance moyenne appelée (Fig. 5). La pointe correspond aux trois tranches d'appel maximum (les plus à gauche), pour un total de 1760 heures (dont 60 heures d'extrême pointe). A l'opposé, la base correspond aux 2 dernières tranches de droite (3000 heures), et correspond à la puissance minimum appelée toute l'année. Enfin, entre les deux, la semi-base correspond aux 4 tranches médianes de 1000 h (pour un total de 4000 heures), et représente donc la puissance minimum appelée au moins 5760 heures dans l'année.

Or chacune de ces tranches fait appel à des moyens identifiables, car à chaque fois que l'on rajoute de la puissance, on procède toujours dans le même ordre. Il est donc possible de calculer le facteur d'émission moyen du mix de chaque tranche, à partir des émissions de CO₂ associées aux différentes tranches d'appel de puissance (Fig. 6).

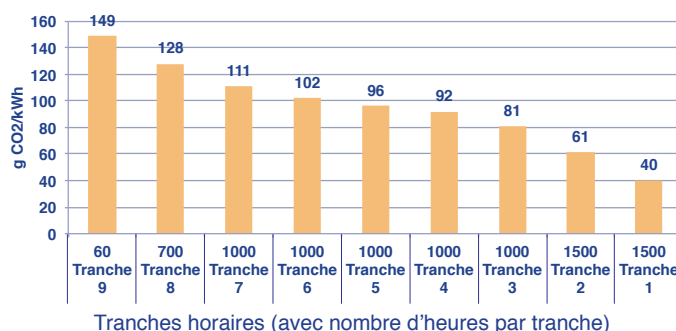


Figure 6 - Facteurs d'émission moyens des tranches horo-saisonnières

A partir de cette approche, nous pouvons calculer un facteur d'émission du mix de production nécessaire pour répondre aux besoins supplémentaires aux heures d'appel de puissances maximales (Fig. 7).

Ce facteur d'émission permet d'évaluer la contribution des moyens qui sont mis en œuvre durant ces heures (1760 h - tranches 7 à 9), pour faire face aux appels de puissance les plus importants de l'année.

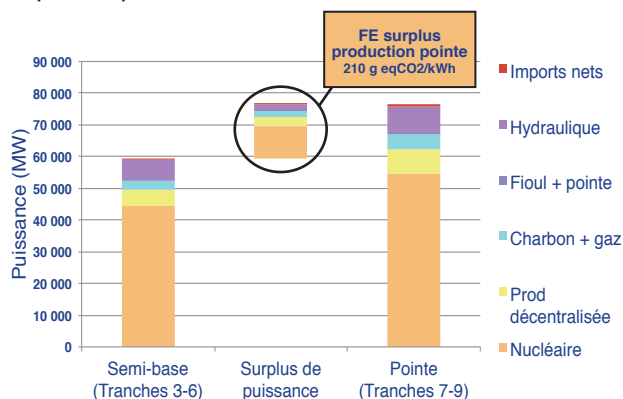
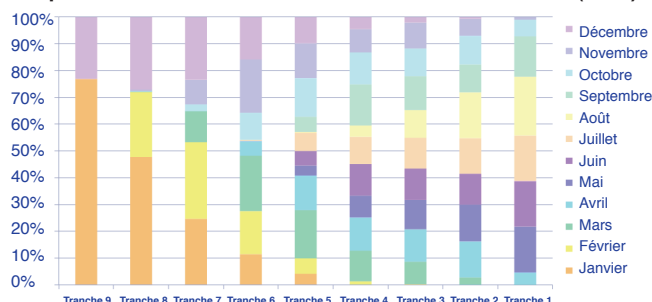


Figure 7 - Facteur d'émissions du mix de production de pointe (moyens de production sollicités pour faire face au surplus de puissance appelée en pointe)

FE par usage

En analysant la répartition des tranches horaires sur les mois de l'année (Fig. 8), on constate que les tranches 7, 8 et 9, qui correspondent aux appels de puissance les plus importants, sont concentrées uniquement sur l'hiver (novembre à mars), et à l'opposé, que les tranches 1 et 2, qui représentent les 3000 h pour lesquels les appels de puissance sont les plus faibles, les mois d'hiver sont très peu, voire pas du tout, représentés.

On comprend bien, avec l'analyse précédente, qu'un mix de production supplémentaire est mis en œuvre afin de répondre aux besoins spécifiques à l'hiver, et ce constat nous amène à nous interroger sur la correspondance possible entre l'utilisation d'une fraction donnée du parc de production et un usage bien identifié (éclairage, transport, chauffage, etc).

Répartition mensuelle des tranches de consommation (2009)**Figure 8 - Répartition des mois de l'année sur les tranches horaires d'appel de puissance**

EDF et l'ADEME ont ainsi travaillé sur cette notion de FE par usage en 2004, et ont défini une méthodologie, qui consiste à diviser la production en deux : une fraction dite « de base » (environ 400 TWh annuels, il ne s'agit donc pas de la même « base » que ci-dessus) et une fraction saisonnée (environ 100 TWh, en pratique essentiellement sollicitée l'hiver). La méthode affecte ensuite un contenu CO_2 à chacune de ces 2 composantes de la production, en faisant des hypothèses sur les moyens qui sont sollicités pour cela. Les deux valeurs correspondantes sont de 40 (base) et 180 (saisonnée) grammes de CO_2 par kWh.

Il convient ensuite d'affecter à chaque usage un coefficient de saisonnalité. Le chauffage, par exemple est un usage 100% spécifique à l'hiver, et le FE du chauffage correspond donc au FE saisonné (180 g CO_2 /kWh). L'éclairage est quant à lui, affecté d'un coefficient de saisonnalisation de 40% (60% base), afin de traduire le surplus d'éclairage nécessaire en hiver, et le FE ainsi calculé pour l'éclairage est d'environ 100 g CO_2 /kWh.

Les principaux résultats de cette méthode sont présentés dans le tableau suivant datant de 2004, publié dans la note EDF⁶.

Indicateurs de contenu en CO_2 de l'électricité consommée en France (en g de CO_2 /kWh_e)

indicateurs détaillés	Référence (valeur moyenne)	à titre indicatif : plages de variation	indicateurs simplifiés
chauffage+ pompes de circ.	180	129 à 261	180 Chauffage
éclairage résidentiel	116	93 à 151	100 Eclairage
éclairage tertiaire	80	64 à 88	
éclairage public et industriel	109	85 à 134	
usages résidentiels : cuisson	82	66 à 93	60 Usages intermittents
usages résidentiels : lavage	79	63 à 88	
usages résidentiels : produits bruns	62	50 à 81	
usages tertiaires : autres	52	41 à 77	
usages industriels (hors éclairage)	55	38 à 86	
usages résidentiels : ECS	40	20 à 72	40 Usages "en base"
usages résidentiels : froid	40		
usages résidentiels : autres	39		
usages tertiaires : climatisation	37		
agriculture-transport	38		
autres (BTP, recherche, armée, etc.)	35		

source : ADEME et EDF, 2004

Figure 9 - Tableau des résultats détaillés du contenu CO_2 par usage, ADEME et EDF, 2004

Cette méthode du FE par usage présente un intérêt majeur qui est l'additivité. En multipliant les consommations des différents usages par le FE de ces usages, nous obtenons en effet les émissions totales de la production d'électricité. Cette caractéristique suppose de ne pas utiliser ce FE pour certains usages et le FE moyen du pays (ou de l'Europe, ou d'un producteur, etc) pour d'autres, car en pareil cas, le total des émissions ne correspondrait pas aux émissions réelles.

FE marginal

Tous les facteurs d'émission que nous avons présentés jusqu'ici avaient pour point commun d'être calculés sur des données historiques, quelle que soit la finesse ou le découpage proposé. Pour réaliser des études prospectives, ces FE sont parfois inappropriés, car le raisonnement pour les calculer n'intègre pas l'impact (de long terme) que peuvent avoir certains usages, ou certaines décisions, sur l'évolution du mix de production.

C'est cette approche qui a conduit la construction d'un FE dit « marginal », dont l'objectif est de déterminer les conséquences sur les émissions de CO_2 que peut avoir une décision du consommateur qui augmente la consommation électrique, ou modifie la forme de la monotone (accroissement de la demande pour un usage donné, ou apparition d'un nouvel usage). En effet, en pareil cas, il faut imaginer ce qui se passe sur l'appel accru à certains moyens de production, ou à plus long terme la construction de nouvelles unités.

En 2007, l'ADEME et RTE ont proposé une note méthodologique sur le calcul d'un FE marginal⁷. Ce calcul s'appuie sur l'ordre de sollicitation des moyens de production pour satisfaire une demande supplémentaire donnée. Cet ordre reflète les coûts proportionnels de production de chaque installation. Au plus bas de l'empilement se trouvent les productions dites fatales, parmi lesquelles l'éolien et l'hydraulique au fil de l'eau. Suivent le nucléaire, puis le charbon et les cycles combinés au gaz (CCG), et enfin le fioul et les turbines à combustion (TAC). Ainsi, à chaque instant, un accroissement de la demande se traduira par la sollicitation du moyen de production le moins cher parmi ceux encore disponibles. Inversement, une baisse de la demande est compensée par la réduction de la puissance (ou la mise à l'arrêt) du moyen le plus cher parmi ceux utilisés. Selon la terminologie courante, c'est (pour la hausse ou pour la baisse) le moyen de production marginal.

Le FE marginal est alors tout simplement le FE du moyen de production marginal.

Dans la note citée, le contenu marginal en CO_2 pour le chauffage électrique est de l'ordre de 500 à 600 g CO_2 /kWh, soit 3 fois plus que le FE calculé dans le raisonnement

6 Note de cadrage sur le contenu CO_2 du kWh d'usage en France, EDF, 2005

7 Le contenu en CO_2 du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique, ADEME RTE, 2007

précédent par usage. Mais il ne s'applique pas à tout le chauffage électrique : il s'applique au radiateur électrique supplémentaire mis en route en plus de ceux existants. L'appliquer pour calculer les émissions de l'ensemble du chauffage électrique actuel est évidemment faux.

Cette approche du FE marginal est bien adaptée pour analyser des évolutions marginales du système. Par exemple, pour calculer au plus juste les émissions évitées par un effacement ponctuel en jour de pointe, il convient d'évaluer les moyens qui auraient été mis en œuvre pour assurer cette production (en intégrant si nécessaire les interconnexions ou l'évolution du parc de pointe). L'approche marginale permet dans ce cas un calcul plus fin sur les émissions de CO₂, mais il convient d'être attentif au fait qu'elle n'est pas additive (aucune approche marginale ne l'est).

Quel facteur d'émission utiliser ?

Compter les émissions de l'électricité peut se faire de plusieurs manières, avec à l'arrivée des valeurs pouvant être très différentes selon la méthode. Le choix du FE à utiliser - et donc de la méthode - dépendra de l'objectif de l'étude. Il s'agira toujours de traduire, au plus près de la réalité, les émissions qui seront engendrées ou évitées par telle consommation ou tel usage de l'électricité.

Le FE moyen de la France semble ainsi bien adapté pour un Bilan Carbone standard, mais l'impact CO₂ de l'évolution des modes de chauffage sera mieux approché avec un FE par usage, voire un FE marginal.

La question « quel FE pour l'électricité ? » n'a donc jamais de réponse unique : tout dépend de la question posée.

Emmanuel Blanchet
Carbone 4

	FE moyen	FE producteur/ fournisseur	FE horo- saisonnier	FE par usages	FE marginal
Bilan carbone entreprise	●	●	●	●	●
CO ₂ évité par un effacement de consommation (effacement jour de pointe, effacement horaire, ...)	●	●	●	●	●
CO ₂ évité par les renouvelables	●	●	●	●	●
Contenu CO ₂ d'un usage spécifique	●	●	●	●	●
Etude prospective sur le contenu CO ₂ d'un nouvel usage	●	●	●	●	●

Figure 10 - Tableau illustratif de cas d'utilisation des différents facteurs d'émissions