

# Le kWh mal traité

## Deuxième partie : le contenu en CO<sub>2</sub> du kWh

### Introduction

Dans une première partie, publiée dans le numéro 2014-4 de la REE, nous avons traité du « Syndrome de l'énergie primaire », mode d'agrégation statistique de différentes formes d'énergie (fossiles, renouvelables, nucléaire) qui, s'il est détourné de sa finalité initiale, peut conduire à des conclusions abusives. Ce critère est aujourd'hui fréquemment utilisé pour « démontrer » que les usages de l'électricité conduisent à une surconsommation d'énergie alors que le développement de l'utilisation de l'électricité va, en général et tout particulièrement dans notre pays, dans le sens d'une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles, d'une meilleure efficacité économique, d'une réduction du déficit commercial et d'une amélioration du confort et de la finesse de régulation.

A titre d'exemple, on peut rappeler que les diagnostics de performance énergétique des bâtiments (DPE), institués par le décret du 14 septembre 2006 et à présent rendus obligatoires dans la plupart des transactions, doivent aujourd'hui comporter :

- l'indication, pour chaque catégorie d'équipements, de la quantité annuelle d'énergie consommée ou estimée selon



JEAN-PIERRE HAUET

une méthode de calcul conventionnel ainsi qu'une évaluation des dépenses annuelles résultant de ces consommations ;

- l'évaluation de la quantité d'émissions de gaz à effet de serre liée à la quantité annuelle d'énergie consommée ou estimée.

Or la méthode de calcul des consommations est celle de l'énergie primaire. Il s'ensuit que des logements chauffés aux énergies fossiles, le gaz en particulier, apparaissent plus performants que les logements chauffés à l'électricité, même si les émissions en CO<sub>2</sub> qu'ils occasionnent sont notablement supérieures (figure 1). Compte tenu de la primauté donnée au critère « énergie primaire », les logements chauffés au gaz, dont la durée de vie pourra atteindre 100 ans, se trouvent promus aux yeux du public aux dépens de solutions électriques tout aussi respectables.

Bien évidemment, si l'on veut faire du critère « émissions en CO<sub>2</sub> » le critère principal, il faut s'entendre sur les méthodes utilisées pour le calculer et ne pas retomber dans les errements des calculs en énergie primaire. C'est là que les difficultés commencent et c'est l'objet de ce deuxième chapitre.

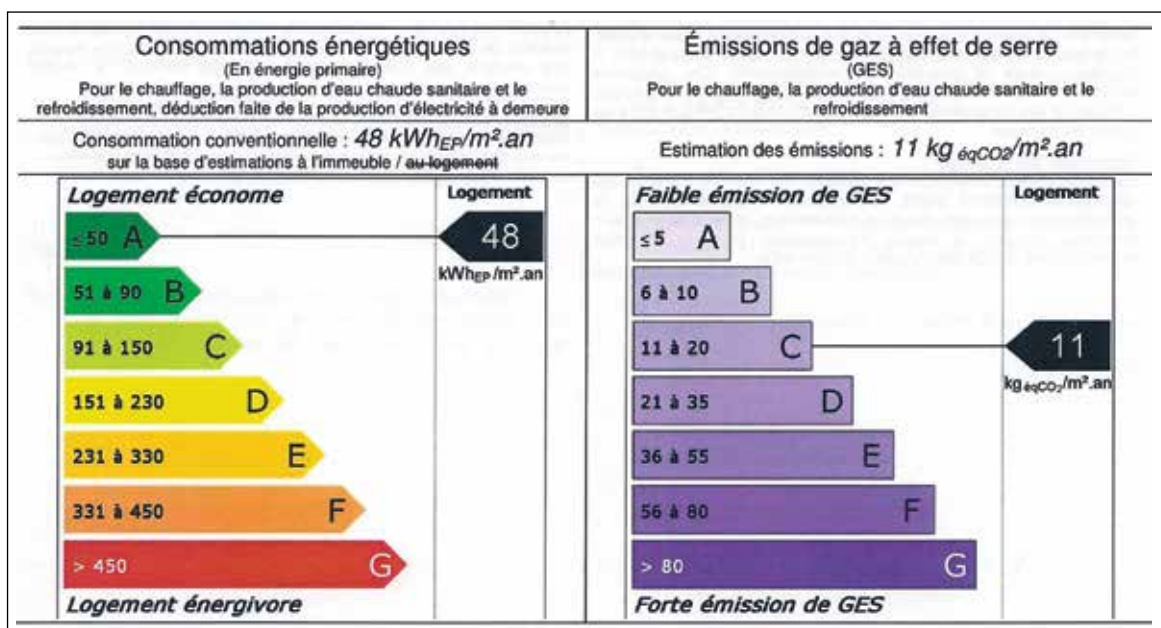


Figure 1 : Exemple de diagnostic de performance énergétique (DPE) réalisé sur un logement RT 2012 chauffé au gaz. La performance affichée en termes d'énergie primaire est optimale mais les émissions de CO<sub>2</sub> se situent à un niveau assez moyen.

Nota : On rappelle cependant que le DPE produit des données normatives et non des consommations réelles.

## La problématique du contenu en CO<sub>2</sub> du kWh

### Bilans, budgets et tableaux de bord

En France, comme dans bien d'autres pays, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est devenue l'une des composantes essentielles des politiques énergétiques et environnementales. Les consommations d'électricité entraînent en effet des émissions de CO<sub>2</sub> qui sont essentiellement fonctions du mode de production de l'électricité. Il est essentiel de savoir quelle est et quelle sera la responsabilité des différents usages de l'électricité dans le bilan en CO<sub>2</sub> de la nation.

L'évaluation des contenus en CO<sub>2</sub> des usages de l'électricité est nécessaire pour dresser les bilans des émissions de gaz à effet de serre prévus par l'article L229-25 du Code de l'environnement. Elle intervient également, comme nous l'avons vu, dans l'établissement des diagnostics de performance énergétique des bâtiments. Elle pourrait également être prise en compte dans la fixation des coefficients de modulation rentrant dans le calcul de la consommation conventionnelle en énergie primaire des bâtiments nouveaux qui est à la base de la RT 2012 (article 12 de l'arrêté du 26 octobre 2010).

A l'avenir, le projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte<sup>1</sup> prévoit l'établissement d'une stratégie nationale de développement à faible intensité de carbone s'appuyant sur la notion de « budget carbone ». Ce texte stipule notamment que :

*« Le décret fixant la stratégie bas-carbone répartit le budget carbone de chacune des périodes mentionnées à l'article L.222-0-1 par grands secteurs, notamment ceux pour lesquels la France a pris des engagements communautaires ou internationaux.*

*La stratégie bas-carbone décrit les orientations et les dispositions d'ordre sectoriel ou transversal qui doivent être établies pour respecter le budget carbone ».*

La définition de contenus en CO<sub>2</sub> du kWh par usage prend donc une importance accrue, non plus seulement pour établir des bilans mais aussi pour arrêter des budgets ou des objectifs annuels, par périodes successives, et par conséquent pour établir des feuilles de route et des tableaux de bord.

### Un problème simple en apparence mais difficile à traiter

La question du contenu en CO<sub>2</sub> du kWh est d'apparence simple et semble relever du bon sens, mais il n'en est rien.

On peut envisager la question à la production ou à la consommation.

A la production, on sait que les centrales électriques sont plus ou moins émettrices de CO<sub>2</sub> par kWh produit. Les facteurs d'émission couramment admis sont de 740 g/kWh pour les centrales à charbon les plus modernes, à technologie dite ultra-supercritique, et de 370 g/kWh pour les centrales à gaz à cycle combiné les plus performantes. Pour le nucléaire et pour la plupart des énergies renouvelables, le facteur d'émission est pris égal à zéro.

Cependant, lorsqu'on raisonne en ACV (analyse en cycle de vie), on est conduit à majorer les facteurs d'émission directe du montant des émissions imputables au moyen de production considéré tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'au traitement de fin de vie (démantèlement, recyclage...).

La Base Carbone maintenue par l'ADEME<sup>2</sup> propose en décembre 2014 les valeurs suivantes pour les contenus ACV en France continentale :

- Hydraulique : 4,0 g/kWh
- Nucléaire : 6,0 g/kWh
- Eolien : 7,3 g/kWh
- Photovoltaïque : 55 g/kWh

Les analyses ACV sont reconnues dans leur principe mais donnent parfois lieu à contestation.

Plus compliqué est le problème de la production combinée chaleur et électricité : quelle part des émissions rattacher à l'électricité et quelle part à la chaleur ? Le problème est assez marginal en France car la production combinée y est peu développée mais des études faites dans les pays étrangers montrent que, selon les conventions adoptées, les résultats relatifs au facteur d'émission à la production peuvent varier considérablement. En appliquant quatre méthodes différentes au réseau hollandais, Robert Harmsen et Wina Graus<sup>3</sup> sont parvenus à des résultats variant de 367 à 708 g/kWh.

**Le problème est encore plus complexe au niveau de l'utilisation**, lorsqu'on cherche à définir le contenu en CO<sub>2</sub> d'un usage de l'électricité. En effet la mutualisation des ressources induite par le raccordement au réseau de la quasi-totalité des consommateurs d'énergie électrique fait qu'à un instant donné, un certain nombre de moyens de production sont mobilisés pour assurer l'équilibre du réseau en fournissant la puissance nécessaire à la satisfaction des besoins. Sous les réserves qui précèdent, les facteurs d'émission des moyens de production sont connus. Par contre, ces moyens de production se mélangent entre eux pour satisfaire les diverses utilisations de l'électricité. En se plaçant du côté des utilisateurs, il devient

<sup>1</sup> Le « projet » cité ici est le texte disponible à la date de rédaction du présent article, à savoir le texte du projet de loi tel qu'adopté en première lecture par l'Assemblée nationale.

<sup>2</sup> A présent « Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre » – <http://bilans-ges.ademe.fr>

<sup>3</sup> Robert Harmsen and Wina Graus – How much CO<sub>2</sub> emissions do we reduce by saving electricity? A focus on methods - Elsevier 2013.

impossible d'affirmer qu'un usage a été davantage satisfait à partir de tel moyen de production plutôt qu'à partir de tel autre : il n'y a pas de « merit order » des usages de l'électricité. A un instant donné, le problème de la détermination du contenu en CO<sub>2</sub> des usages de l'électricité n'a donc pas de solution mathématiquement démontrable.

### Un écheveau de méthodes contradictoires

Cette situation fait que s'est développé, autour de la problématique du contenu en CO<sub>2</sub> des usages de l'électricité, un écheveau de méthodes fondées tantôt sur des calculs de moyennes, tantôt sur des calculs marginaux, tantôt sur des approches plus originales, en essayant parfois de les classer par ordre de séduction, comme s'il s'agissait d'un concours de beauté, alors que les problèmes traités ainsi qu'on va l'expliquer sont de nature différente.

Ces méthodes conduisent à des résultats extraordinairement dispersés. Une étude publiée en 2012<sup>4</sup> cite des chiffres s'étalant entre 25 et 920 g de CO<sub>2</sub>/kWh. Pour le seul chauffage à l'électricité, on rapporte des évaluations allant de 180 à 700 g de CO<sub>2</sub>/kWh.

Nous verrons que cette situation confuse résulte pour une large part d'une confusion entre le contenu en CO<sub>2</sub> qui peut être affecté à un usage de l'électricité et l'impact que peut avoir, à la marge, la réduction ou l'accroissement d'une consommation d'électricité correspondant à un usage donné.

Mais la propension à préconiser une « méthode » plutôt qu'une autre est rarement dénuée d'arrière-pensées et vise souvent à privilégier celles des approches qui, comme pour le recours à la comptabilité en énergie primaire, permettent de se rapprocher au mieux des résultats que l'on veut obtenir. La suite de l'article vise à apporter des éléments de clarification. Pour cela, il nous faut poser quelques définitions.

### Quelques définitions

**Facteur d'émission** : On réservera le terme « facteur d'émission » au système de production et de distribution de l'électricité<sup>5</sup>. C'est la quantité de CO<sub>2</sub> émise par kWh produit ou livré si l'on tient compte des pertes sur le réseau. Le facteur d'émission est essentiellement fonction de la filière

<sup>4</sup> Analyse comparative des méthodes de calcul du contenu du CO<sub>2</sub> de l'électricité destinée au chauffage - Energies et avenir (2012).

<sup>5</sup> Dans la littérature, les notions de « facteur CO<sub>2</sub> » ou « facteur carbone » sont souvent employées au niveau de l'utilisation de l'électricité comme de sa production. Ceci est à l'origine de confusion avec les facteurs d'émission, tels que définis dans la présente note et qui sont indépendants de l'utilisation faite de l'électricité. Toutefois au niveau de l'ensemble du système électrique, la production est égale à la consommation (au stockage et aux échanges externes près) et le facteur d'émission moyen est égal à tout instant au contenu en CO<sub>2</sub> moyen de l'ensemble des usages.

de production considérée et peut s'exprimer en « émissions directes » ou en ACV. Les facteurs d'émission directe constituent des données factuelles et mesurables, sous réserve de l'incertitude introduite par la production combinée chaleur/électricité.

**Usage de l'électricité** : Un usage de l'électricité est un ensemble de consommations présentant de façon durable des caractéristiques similaires et répondant à une même finalité pour le client. On pourra par exemple segmenter le marché de l'électricité en une dizaine d'usages. C'est donc un ensemble beaucoup plus vaste qu'une action ponctuelle de consommation.

**Action** : Une action, ou un projet, peut être défini(e) comme une interaction avec le système électrique entraînant une modification des paramètres de fonctionnement du réseau. Une action peut être une consommation nouvelle ou au contraire une réduction de consommation résultant, par exemple, d'un effort de maîtrise de l'énergie. Une action peut n'avoir aucun impact sur les consommations mais cependant entraîner une modification du mix électrique, par exemple si elle se traduit par un reprofilage dans le temps de la puissance appelée.

**Contenu en CO<sub>2</sub>** : Nous réservons le terme « contenu en CO<sub>2</sub> » à la quantité de CO<sub>2</sub> émise par le système électrique qui peut être affectée, à un instant donné ou en moyenne sur une période convenue, à un usage déterminé. Les contenus peuvent être déterminés pour le passé, sous forme de bilans, pour le futur sous forme de budgets ou pour le présent sous forme de tableaux de bord. Les contenus moyens annuels revêtent une importance particulière pour le suivi des politiques énergétiques et environnementales.

Si l'usage considéré a pour finalité la production d'un produit ou d'un bien, on peut rapporter son contenu en CO<sub>2</sub> à la production correspondant à cet usage : on pourra parler, par exemple, du contenu en CO<sub>2</sub> d'une tonne de ciment.

**Impact** : Cette notion se réfère à la variation des émissions de CO<sub>2</sub> entraînée par une action donnée sur les émissions du système, cette action étant prise en marginal, c'est-à-dire toutes choses égales par ailleurs. Cette notion n'a de sens que pour un contexte donné. La même action considérée à des moments différents peut conduire à des impacts différents voire opposés.

Certains rapportent l'impact à la variation de la consommation d'énergie électrique exprimée kWh induite éventuellement par l'action considérée. On pourrait alors parler de « facteur d'impact » mais un tel indicateur doit être manipulé avec la plus grande circonspection : l'impact d'une même action en termes de kWh peut en effet être positif, nul ou négatif selon le contexte.

Ces définitions posées nous allons examiner deux types d'approches :

- les approches en moyenne applicables à la détermination des contenus en CO<sub>2</sub> ;
- les approches marginales applicables au calcul des facteurs d'impact.

## La détermination des contenus en CO<sub>2</sub> par usage

### Exigences essentielles

Les contenus en CO<sub>2</sub> sont destinés à affecter un contenu CO<sub>2</sub> à chaque usage afin d'une part de pouvoir dresser des budgets et des bilans, d'autre part de pouvoir intégrer la répartition des émissions correspondante dans les politiques publiques et d'envoyer ainsi au consommateur le signal approprié et faire en sorte que, au moment du bilan, la réalisation soit en ligne avec le budget.

Toute méthode de détermination des contenus CO<sub>2</sub> des usages est nécessairement conventionnelle. Une méthode doit cependant satisfaire à certains critères essentiels sauf à prendre le risque de conduire à des incohérences ou plus simplement de ne pas répondre à l'objectif précédemment défini.

Nous énonçons dans le tableau 1 six exigences essentielles qui sont de natures diverses :

#### Exigences essentielles

- 1 Etre objective, transparente et stable
- 2 Pouvoir être utilisée en historique (bilans) comme en prospectif (budget), sans engendrer de solution de continuité  
Etre additive : sur une période de temps quelconque, la somme des émissions de CO<sub>2</sub> de l'ensemble des usages doit être égale au total des émissions prévues ou constatées
- 3 Etre commutative : les émissions imputées à deux nouveaux usages simultanés ne doivent pas être dépendantes de l'ordre dans lequel on les considère
- 4 Pouvoir prendre en compte les émissions en ACV
- 6 Permettre d'intégrer, selon une méthode appropriée, les émissions liées aux échanges d'électricité

Tableau 1 : Exigences essentielles pour une méthode de détermination des contenus par usage.

La première exigence regroupe divers critères que l'on peut exiger de toute méthode de mesure. Le critère de stabilité est important : il signifie que la méthode appliquée à des instants distincts mais rapprochés, ne doit pas conduire à des résultats différents. Ceci doit amener à écarter les méthodes qui conduiraient à des résultats « chaotiques », trop sensibles aux conditions aux limites.

La deuxième exigence a déjà été évoquée en introduction.

La troisième exigence est une exigence de cohérence fondamentale. On ne concevrait pas, en historique que la somme des émissions affectées à chacun des usages ne corresponde pas au total des émissions. Il doit en aller de même en prospectif car si le critère n'est pas respecté, cela veut dire que la répartition des émissions sur laquelle on va bâtir les politiques publiques ne correspond pas à celle à laquelle on veut parvenir à un certain horizon, que certains usages sont surpondérés ou sous-pondérés et donc que l'on envoie des signaux biaisés au consommateur.

Le quatrième critère est également un critère de cohérence mais il est moins intuitif. En règle générale, une politique énergétique ou environnementale va impliquer simultanément plusieurs usages : par exemple le logement et les transports. Il faut alors que la détermination des contenus en CO<sub>2</sub> affectés à chacun des usages ne soit pas fonction de l'ordre dans lesquels on les considère. Une telle exigence n'est pas triviale et est de même inspiration que le fameux paradoxe de Condorcet<sup>6</sup>.

La cinquième exigence est de nature essentiellement technique. La méthode doit pouvoir prendre en compte, si on le souhaite, les facteurs d'émission exprimés en ACV. Cette exigence est aisée à satisfaire.

La dernière exigence est technique mais elle est également politique. La question est en effet de savoir si l'on souhaite que les politiques publiques de la France, et donc le choix des consommateurs français, soient influencées par les décisions prises et par les investissements faits au-delà de nos frontières, en Allemagne par exemple. Le projet de loi sur la transition énergétique apporte un élément de réponse en se référant aux « engagements européens ou internationaux de la France » et par conséquent aux méthodes d'évaluation des bilans d'émission qui les sous-tendent.

Ces exigences posées, nous présentons brièvement ci-après deux méthodes qui y répondent et dont la compréhension nous paraît essentielle.

### La méthode proportionnelle intégrale

Il est impossible, dans un fonctionnement en réseau, d'affecter une ressource déterminée à un usage particulier et de considérer qu'un usage est davantage alimenté à partir d'une ressource plutôt qu'à partir d'une autre. Dans ces conditions, il est naturel de considérer qu'à tout instant un kWh consommé provient, quel qu'en soit l'usage, des différentes sources selon une répartition qui correspond à la répartition des puissances

<sup>6</sup> Le paradoxe de Condorcet, ou paradoxe des choix successifs, fait que le résultat d'une élection faite de duels successifs peut dépendre de l'ordre dans lesquels ces duels interviennent. Il se manifeste lorsque l'on analyse les candidats en termes de préférence relative, l'un par rapport à l'autre, et non en termes de préférence absolue.

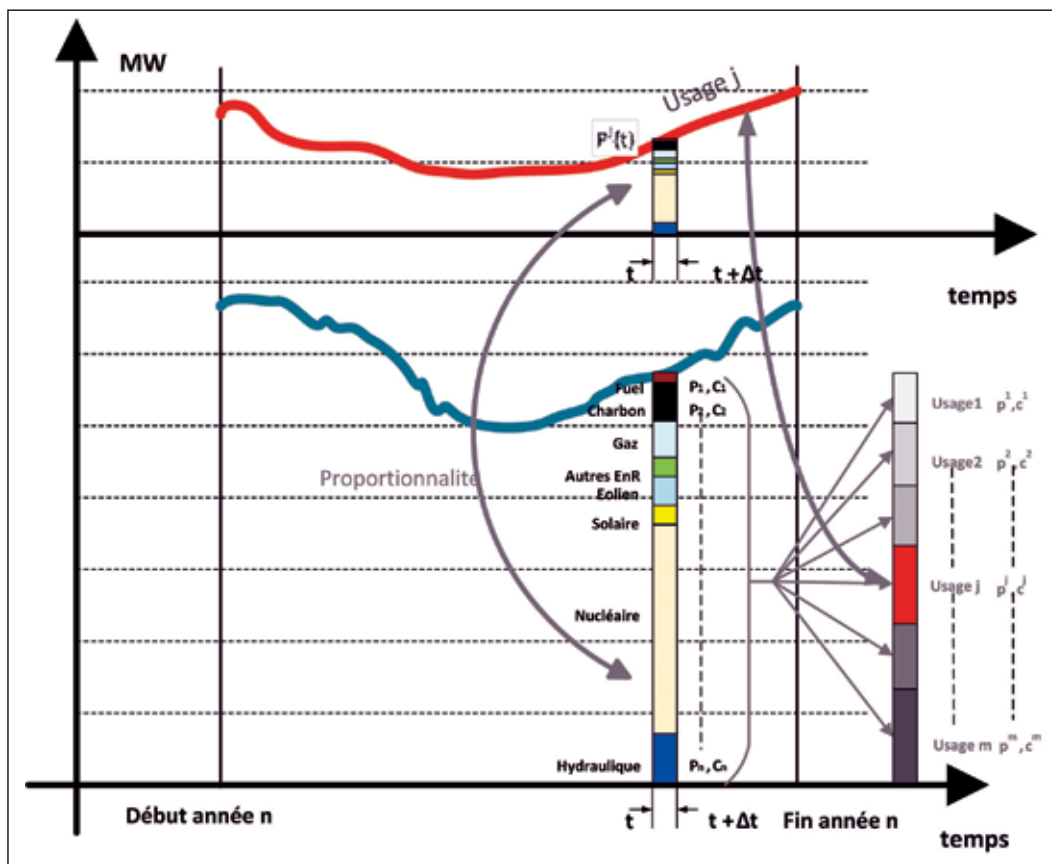


Figure 2 : Principes de la méthode proportionnelle intégrale - Source : Auteur.

fournies par chacune de ces ressources. Les contenus CO<sub>2</sub> instantanés de tous les usages sont alors identiques et égaux au facteur d'émission moyen du système électrique à cet instant.

La différence entre les usages provient du fait que les puissances appelées varient au cours de l'année selon des profils qui leur sont propres. Il est alors possible d'intégrer sur l'année, après avoir choisi un pas de temps approprié, les contenus CO<sub>2</sub> instantanés et d'en déduire un contenu moyen en CO<sub>2</sub> pour l'année et pour chaque usage. Une moyenne statistique sur plusieurs années permet de s'affranchir de l'aléa climatique. C'est ce qu'on appelle **la méthode proportionnelle intégrale** illustrée par la figure 2.

Cette méthode répond aux exigences listées précédemment. Elle peut cependant poser des problèmes pratiques de calcul si l'on envisage des pas de temps trop fins.

### La méthode saisonnée par usages

En 2005, EDF et l'ADEME ont élaboré une méthode dite « saisonnée par usages » qui a été actualisée et affinée en 2011 dans le cadre du Comité de gouvernance de la Base Carbone<sup>7</sup>. Cette méthode résulte d'un compromis entre

des positions au départ relativement distantes. Elle peut cependant être théorisée comme une approximation de la méthode proportionnelle intégrale et c'est ce que nous expliquons ci-après.

La méthode retient neuf usages différents de l'électricité. La consommation totale et les émissions qui en résultent se trouvent réparties en neuf lignes associées à chacun de ces usages.

La structure de production est simplifiée et ramenée à deux composantes :

- **la production de base**, stable sur toute l'année ;
- **la production saisonnée**, à laquelle il est fait appel de façon variable selon les usages.

Pour chacune de ces deux ressources, des facteurs d'émission ont été déterminés et ont été supposés constants sur l'année. Ils ont été moyennés sur trois ans (2008 à 2010 pour la version 2011 de la méthode) afin d'atténuer l'effet des variations climatiques puis transposés au lieu de consommation en tenant compte des pertes du système électrique.

usages de l'électricité distribuée en France métropolitaine entre 2008 et 2010 – Rapport méthodologique Présentant les hypothèses et choix du Comité de Gouvernance de la Base Carbone – ADEME novembre 2011.

<sup>7</sup> Evaluation du contenu en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) des différents

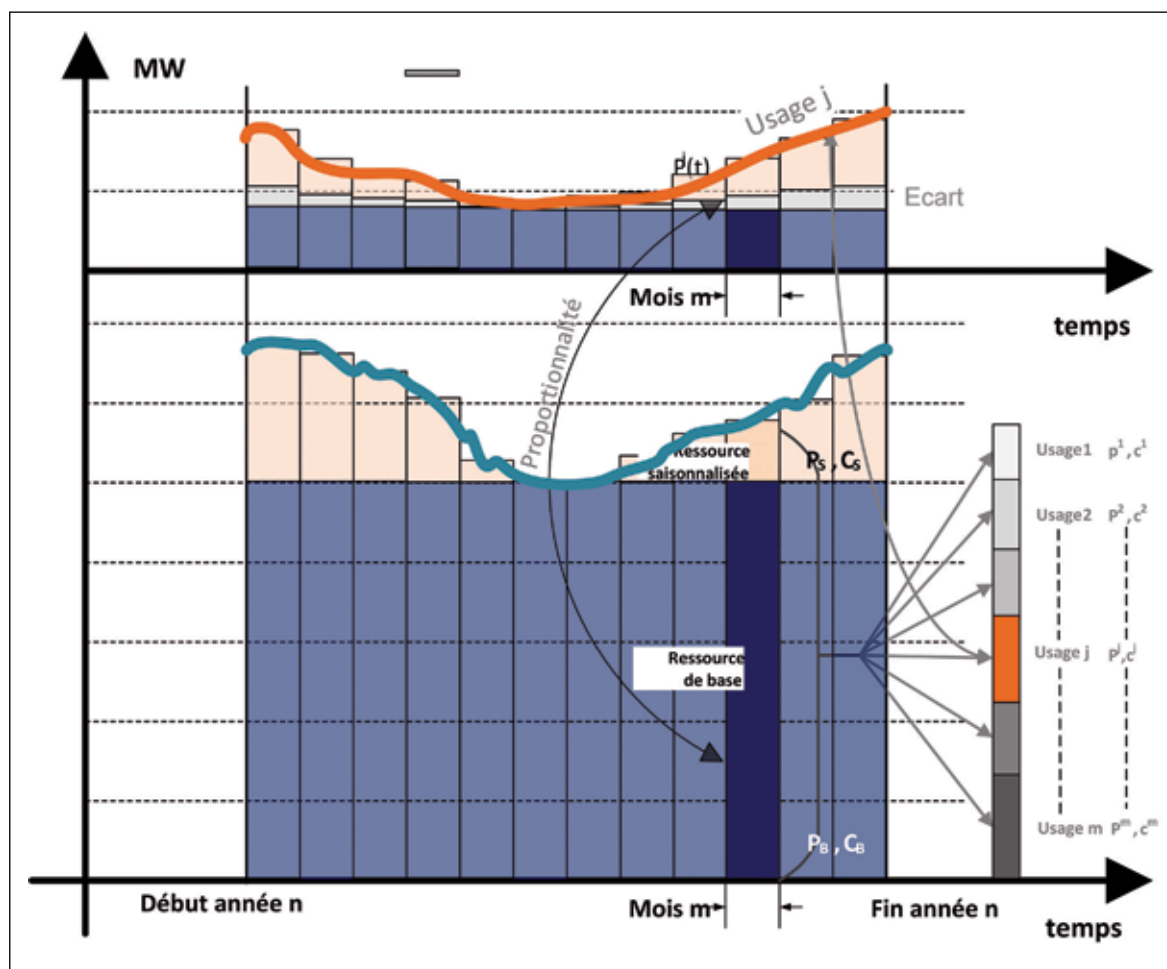


Figure 3 : Principes de la méthode proportionnelle saisonnalisée - Source : Auteur.

Pour chaque usage, la détermination de la part de la puissance fournie par une ressource de base (resp. saisonnalisée) se fait sur la base d'un pas de temps mensuel, avant intégration sur l'année. Les travaux du groupe de travail à l'origine de la méthode<sup>7</sup> ont conduit en effet à démontrer statistiquement qu'à la fois pour les appels thermiques et pour le facteur  $CO_2$ , la composante mensuelle était systématiquement prédominante et donc que le pas mensuel était « le meilleur proxy » (figure 3).

La contribution de la ressource de base est estimée être, chaque mois, égale au minimum de puissance appelé par l'usage considéré sur l'ensemble de l'année. Par rapport à la méthode proportionnelle intégrale, ceci introduit un écart, non négligeable, qui pénalise les usages les plus saisonnalisés puisque la méthode ne prend pas en compte les complémentarités qui peuvent exister entre usages. Ainsi l'usage « chauffage des logements » apparaît-il comme étant à 100 % satisfait par la ressource saisonnalisée alors que, s'il est associé à un autre usage, « transport » ou « conditionnement de locaux tertiaires », l'ensemble peut, dans une

proportion plus ou moins importante, être couvert par la ressource de base<sup>8</sup>.

Les échanges d'électricité aux frontières sont supposés :

- provenir de la ressource de base s'ils sont excédentaires ;
- être chargés en  $CO_2$  au niveau moyen européen s'ils sont déficitaires.

Cette façon de compter a été admise par les parties concernées en 2011 mais elle est plus pénalisante pour le contenu  $CO_2$  que les règles généralement appliquées pour le calcul des émissions nationales qui n'intègrent aucune émission liée aux importations de biens, quels qu'ils soient.

In fine, la méthode saisonnalisée par usages (version 2011) conduit aux résultats du tableau 2 qui distingue les émissions directes et les émissions totales résultant d'un calcul en ACV.

<sup>8</sup> Dans le tableau 2, le contenu de l'usage « chauffage » ressort à 181 g/kWh alors que la méthode proportionnelle intégrale conduirait à lui attribuer une valeur de 80 g/kWh. A contrario, les usages industriels ressortent à 33,6 g/kWh alors que la méthode proportionnelle intégrale conduit à 60 g/kWh.

En g/kWh	Emissions directes	Emissions directes et indirectes
<b>Chauffage</b>	181	213
<b>Eclairage résidentiel</b>	92,8	115
<b>Eclairage public &amp; industriel</b>	72,3	92,3
<b>Cuisson résidentiel</b>	56,7	75
<b>Climatisation tertiaire</b>	41,9	58,6
<b>Usages industriels de base</b>	33,6	49,4
<b>ECS</b>	41,5	58,2
<b>Autres usages (BTP, recherche, armées...)</b>	40	55
<b>Transports</b>	32	53

Tableau 2 : Contenu carbone des différents usages de l'électricité selon la méthode proportionnelle saisonnalisée - Source : Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre - ADEME décembre 2014.

La méthode est destinée à être mise à jour régulièrement. Elle répond intégralement aux exigences du tableau 1 et constitue une référence admise par les parties avec la réserve importante que les contenus en CO<sub>2</sub> résultant de cette méthode n'auraient, selon certains, vocation à n'être utilisés que dans la partie « historique » des bilans de gaz à effet de serre.

**La définition d'une méthode applicable aux estimations prospectives reste sujette à débat. C'est cet aspect que nous allons à présent aborder.**

### Impacts et approches marginales

L'impact d'une action est la mesure de l'incidence de cette action sur les émissions en CO<sub>2</sub> du système électrique. L'action considérée peut consister en une variation de consommation ou en une modification du système de production. Le facteur d'impact est l'impact ramené à la variation de kWh consommés.

La détermination de l'impact relève du calcul marginal, c'est-à-dire de la description différentielle d'une situation par rapport à une autre. Il n'est pas besoin de revenir ici sur les principes du calcul marginal qui sont bien connus. Mais ses limites le sont également.

### L'approche marginale de court terme

On connaît les paradoxes auxquels peut conduire un calcul marginal « de court terme » supposant que les infrastructures ne sont pas affectées par l'action considérée et que seules sont à prendre en compte les variations à la marge des facteurs de production. Appliqué aux prix, ce genre de calcul peut conduire à des résultats extrêmes qui ne sont soutenables ni en amplitude ni dans le temps – c'est le paradoxe du voyageur de Calais énoncé par Maurice Allais, prix Nobel d'économie<sup>9</sup> –.

<sup>9</sup> Paradoxe économique mis en évidence par l'économiste Maurice Allais

Dans le cas des systèmes électriques, une approche marginale simpliste pourrait consister à noter que, dans le système électrique européen actuel, le combustible marginal l'été est le charbon alors qu'en hiver, c'est en général le charbon durant la nuit et le gaz durant les heures les plus chargées. Donc plus un usage est saisonnalisé, plus son contenu marginal court terme en CO<sub>2</sub> serait faible. Mais ce serait ignorer les effets que peut avoir chaque usage sur la configuration du système électrique.

Il s'ajoute un autre phénomène, plus subtil, qui conduit à ne pas retenir l'approche marginale de court terme. En effet, le dispositif de production de l'électricité est optimisé à chaque instant, en fonction du facteur de mérite des centrales en état de marche, la puissance requise étant obtenue en empilant les moyens de production en fonction de leur coût marginal croissant, tout en tenant compte d'autres facteurs tels que les politiques de maintenance des centrales ou de gestion de la réserve hydraulique. Cette optimisation économique est très éloignée de celle à laquelle conduirait une optimisation en fonction des facteurs d'émission de CO<sub>2</sub><sup>10</sup>. En conséquence, la variation de l'empilement des moyens de production peut conduire à des discontinuités très fortes des facteurs marginaux d'émission du système de production au cours d'une même journée (figure 4), pour autant que l'on puisse d'ailleurs connaître quelle est exactement la centrale marginale à un instant donné, ce qui n'est généralement pas le cas.

Certains pensent contourner cet obstacle en invoquant un « marginal moyen sur l'année » (par exemple : nucléaire marginal 30 % du temps, hydraulique 10 %, charbon 30 %, etc.). Mais cette approche se heurte à la difficulté de connaître cette répartition et surtout au fait qu'elle est nécessairement impactée par la variation marginale considérée.

Appliquée à un kWh consommé ou économisé, l'approche marginale de court terme mène en conséquence à des résultats instables et non reproductibles qui conduisent à l'écartier.

### L'approche marginale en développement (ou incrémentale)

L'approche marginale « de long terme », « en développement » ou « incrémentale » consiste à prendre en considération l'incidence sur les structures du système électrique

concernant la notion de coût marginal. Étant donné un voyageur monté à la hâte dans un train, le prix du billet peut être évalué de manière très différente en suivant divers raisonnements économiques en apparence rigoureux. Le coût peut être considéré comme nul (le voyageur n'entraîne pas de surcoût), fixé à une fraction du coût d'un wagon supplémentaire ou intégrer divers coûts dont celui de l'entretien ou l'extension du réseau ferroviaire. Voir encadré 3 en fin d'article.

<sup>10</sup> Il faudrait pour cela que le prix du CO<sub>2</sub> atteigne un niveau très supérieur à son cours actuel qui ne pèse que pour quelques pourcents dans le prix de revient du kWh produit.

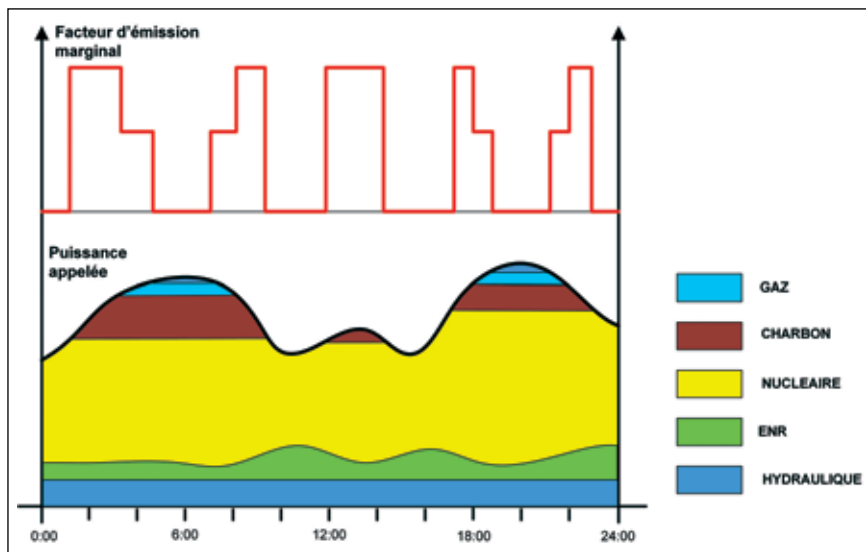


Figure 4 : Schéma de principe illustrant la très grande variabilité du facteur marginal d'émission d'un système électrique comparable au système français au cours d'une journée - Source : Auteur.

d'une action qui sera en règle générale importante et durable. Cette méthode est celle recommandée par le GHG Protocol pour juger de l'impact d'un projet sur les émissions de CO<sub>2</sub><sup>11</sup>. Elle peut être utilisée pour comparer deux stratégies entre elles ou pour évaluer une variante par rapport à une stratégie de base. Elle permet de tenir compte des réoptimisations du système électrique engendrées par des hypothèses variées sur la consommation ou la structure des moyens de production. La quantité de CO<sub>2</sub> émise est l'un des facteurs qu'il est naturel de considérer dans une telle comparaison.

Certains pensent qu'en rapportant l'impact CO<sub>2</sub> ainsi calculé au différentiel de consommation lié à l'action, on rend mieux compte que par un calcul de contenu par usage, des tendances d'évolution à long terme des émissions associées au développement des usages de l'électricité. Ils soutiennent que l'on peut, grâce à ces facteurs d'impact, envoyer un signal plus clair au consommateur.

Cette façon de penser procède de la confusion déjà signalée entre les deux notions de *contenu par usage* et *d'impact* que nous allons à présent expliciter.

### Pourquoi les facteurs d'impact ne sont-ils pas des contenus ?

On rappellera tout d'abord que les contenus par usage sont nécessairement conventionnels alors que l'impact d'une action donnée peut se calculer de façon objective. On per-

çoit ainsi d'emblée qu'il y a une différence fondamentale entre les deux notions.

Cette différence est liée au rôle joué par le réseau qui permet la mutualisation des ressources. Si le calcul marginal est mathématiquement et économiquement correct pour juger de l'impact d'une action donnée, il n'autorise pas pour autant à considérer que le facteur d'impact en CO<sub>2</sub> de cette action constitue le contenu en CO<sub>2</sub> de l'usage correspondant. Cela supposerait en effet :

- soit que la mutualisation n'existe pas pour l'action considérée et qu'il existe un lien physique, inamovible et spécifique, entre la sollicitation additionnelle et les moyens mobilisés pour y répondre, ce qui n'est évidemment pas le cas général ;
- soit que, de façon conventionnelle, on décide de faire bénéficier d'une sorte de « privilège du grand-père » les usages antérieurs, en leur affectant arbitrairement les moyens de production préexistants, ce qui équivaut à admettre une différence de traitement entre usages identiques et contrevient aux principes de cohérence du tableau 1 (non additivité et non commutativité).

On peut illustrer ce raisonnement par la métaphore imaginée à propos d'un réseau d'alimentation en eau et décrite dans l'encadré N°1.

On peut aussi aborder la question par une approche plus formelle.

Si l'on désigne par :

- $j$  de 1 à  $n$  : les différents usages de l'électricité
- $C_j$  : le contenu en CO<sub>2</sub> affecté à l'usage  $j$
- $P_j(t)$  : la puissance appelée par l'usage  $j$  à l'instant  $t$
- $E(t)$  : les émissions instantanées de l'ensemble du système

<sup>11</sup> <http://www.ghgprotocol.org> – "These guidelines explain how to quantify reductions in greenhouse gas emissions resulting from projects that either generate or reduce the consumption of electricity transmitted over power grids".



Une cité peut être alimentée en eau par deux sources :

- une source d'eau souterraine qui est l'alimentation traditionnelle dont le débit est constant mais limité ;
- une rivière que l'on peut solliciter pour compléter la ressource souterraine après traitement.

La construction de nouvelles résidences fait qu'il faut à présent à certains moments compléter l'eau souterraine par de l'eau de surface. Les deux eaux sont mélangées dans les réservoirs de la ville avant d'être distribuées.

Viendrait-il à l'idée de soutenir que les nouveaux consommateurs branchés sur le même réseau que les anciens, consomment de l'eau de surface (ou même, ont une propension particulière à consommer de l'eau de surface) alors qu'au même moment les anciens continueraient à consommer de l'eau à 100 % souterraine ?

Encadré 1 : Le parallèle avec un réseau de distribution d'eau.

Nous avons à tout moment la relation :

$$E(t) = \sum_j C_j * P_j(t)$$

Une variation de la puissance appelée par l'usage j, se traduit par un différentiel d'émission :

$$\Delta E(t) = C_j * \Delta P_j(t) + \Delta C_j * P_j(t)$$

Considérer que le contenu C<sub>j</sub> peut être appréhendé par le rapport  $\frac{\Delta E(t)}{\Delta P_j(t)}$  revient à négliger le deuxième terme dans

l'équation qui précède. Or celui-ci peut-être très important au point de compenser, intégralement et même au-delà, le premier. Il est aisé de bâtir des exemples en ce sens<sup>12</sup>.

Le fait de ne reconnaître qu'une valeur conventionnelle aux contenus par usage pourrait sembler affaiblir l'intérêt du concept. Cependant la vie de tous les jours utilisent beaucoup de valeurs conventionnelles sans que l'on trouve à y redire. L'encadré 2 en donne un exemple et met simultanément en évidence les limites d'une approche marginale. La connaissance du tout permet de calculer des écarts mais la connaissance d'écarts n'est pas suffisante pour décrire le tout.

<sup>12</sup> A titre de parallèle et pour illustrer l'importance des phénomènes de reconfiguration des systèmes électriques, on rappellera que l'accroissement du recours aux EnR en Allemagne pour la production d'électricité se traduit par un accroissement des émissions de CO<sub>2</sub> du fait de la reconfiguration des moyens de production en faveur du charbon.

Deux alpinistes lancés dans l'ascension d'un sommet progressent à des rythmes différents. A un instant donné, le premier d'entre eux se retrouve à une altitude de 20 mètres supérieure à celle du second. Cette constatation permet de classer, à cet instant, la performance de l'un par rapport l'autre. Mais elle ne donne aucune indication sur les altitudes que nos deux alpinistes ont atteintes. Elle ne permet donc pas de dire s'ils sont en avance ou en retard par rapport à leur tableau de marche. On observera en outre que la notion d'altitude est conventionnelle et n'a de sens que par rapport à un repère convenu. Alors que la différence d'altitude est parfaitement mesurable.

Encadré 2 : Les limites des données marginales.

### La méthode proportionnelle utilisée en prospective

La bonne méthode pour calculer des contenus prospectifs par usage nous semble être celle de l'approche proportionnelle intégrale extrapolée dans les années à venir. A partir d'une ou de plusieurs années de référence, si l'on est en mesure de décrire l'évolution du système électrique à l'horizon d'une année n, en production comme en consommation, il est possible d'appliquer la règle de proportionnalité décrite au début de cet article à tout usage identifié dans l'année n. Ceci conduit à des contenus prospectifs en CO<sub>2</sub> pour chacun de ces usages et pour chaque pas de temps de cette année n. Une intégration sur l'année conduit aux résultats recherchés.

Ce calcul peut s'accompagner de la simulation d'un nombre suffisant de scénarios climatiques afin que les profils production/consommation utilisés soient suffisamment proches de leur espérance mathématique.

Il est en outre loisible d'admettre, si le scénario d'évolution du système électrique ne présente pas de discontinuité majeure, que la répartition des contenus par usage calculée pour l'année n sera valable pour les années comprises entre n-m et n+m. Pour revenir aux dispositions prévues par la loi de transition énergétique, il sera ainsi possible de bâtir les budgets carbone prévus pour chacune des périodes retenues par le projet de loi sur la transition énergétique : 2015-2018, 2019-2023, 2024-2028, 2029-2033 et suivantes. On disposera ainsi d'une « feuille de route carbone » permettant de suivre, en global et par usage, la progression des émissions et d'opérer, s'il y a lieu, les infléchissements nécessaires.

Bien entendu, il est possible d'utiliser de préférence à la méthode proportionnelle intégrale une autre méthode, simi-

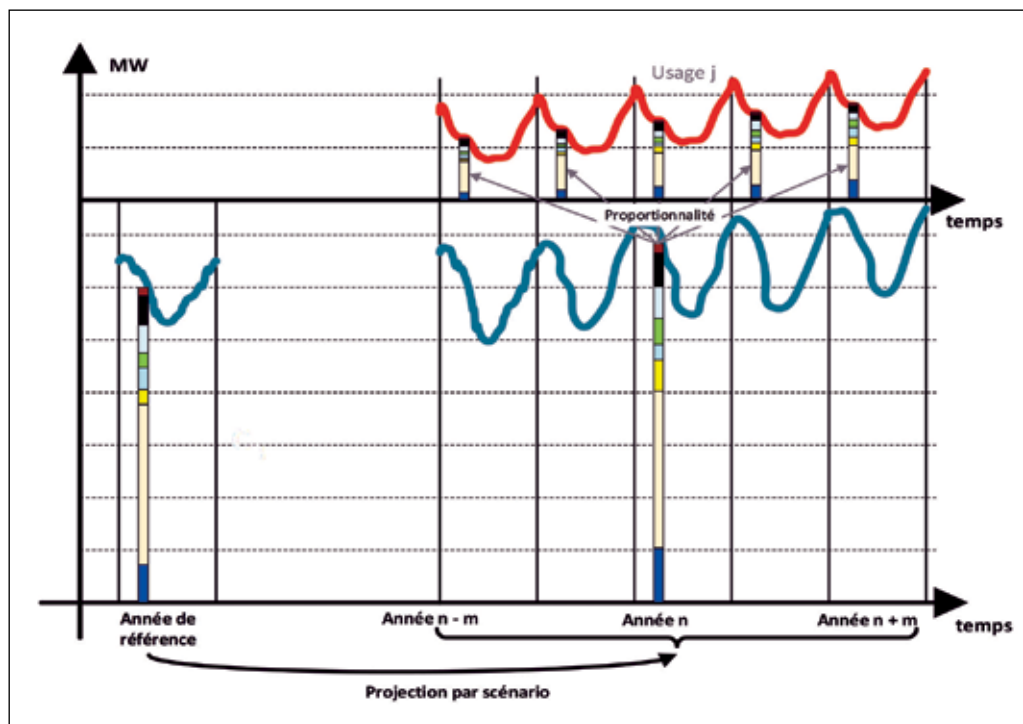


Figure 5 : Principes de la méthode proportionnelle intégrale utilisée en prospectif - Source : Auteur.

laire ou simplifiée, telle que la méthode saisonnalisée, à la condition qu'elle respecte les exigences préalablement listées.

### Conclusion : de la bonne utilisation du contenu par usage et du calcul d'impact

La définition des contenus par usage est un sujet d'actualité qui se pose dès que l'on cherche à établir des bilans, des budgets, des feuilles de route et des tableaux de bord.

La méthode proportionnelle intégrale est fondée sur une logique très simple et très intuitive d'équité de répartition des ressources électriques entre les usages. Cependant la méthode « saisonnalisée par usage » qui en est proche, a de bonnes propriétés pour évaluer un contenu par usage de façon historique mais aussi prospective.

Comme dans bien d'autres secteurs de la vie économique, l'approche marginale de court terme est à écarter et peut conduire à des résultats aberrants. Cette inadaptation est liée à la volatilité des facteurs marginaux d'émission, mais aussi, et de façon plus organique, à l'absence de prise en compte de l'adaptation du système face à l'évolution des usages.

L'approche marginale en développement ou incrémentale est légitime pour analyser les conséquences de stratégies possibles et décider en conséquence de celle qui sera suivie. Elle peut donc utilement éclairer des choix de politique publique mais requiert une cohérence économique élevée (il s'agit de comparer deux situations optimisées et de préciser quelles sont les variables et critères d'optimisation, le

souci de décarbonation en faisant forcément partie). Mais une fois la décision prise et les projections du système électrique calculées à différents horizons dans le cadre de cette stratégie, ce sont les contenus par usage qui doivent fixer le cap et servir de référence pour établir des feuilles de route et dresser des bilans.

L'objection selon laquelle les contenus par usage ne refléteraient pas avec suffisamment de force la ligne à suivre n'est pas fondée. **Elle procède d'une confusion entre la donnée et l'utilisation que l'on veut faire de cette donnée**<sup>13</sup>. Partant d'une répartition des émissions considérée comme un objectif stratégique à un horizon donné (par exemple 2030 ou 2035), il peut advenir que l'on constate lors d'un point d'étape (par exemple en 2020 ou 2025) que l'on s'écarte de la trajectoire permettant d'atteindre l'objectif fixé :

- soit du fait d'écarts dans les contenus par usage instantanés ;
- soit du fait de la croissance ou de la décroissance d'un usage non conforme aux orientations.

Il est alors possible de prendre des mesures correctrices ou incitatives visant à se repositionner sur la trajectoire voulue. Sans que ce soit le seul levier d'action possible, ces mesures peuvent s'appuyer sur les contenus par usage. Mais il n'est pas opportun d'en distordre les valeurs en retenant des coefficients marginaux qui n'auraient qu'une signification fugace, qui

<sup>13</sup> Viendrait-il à l'idée de dire à un malade qui a 38 °C de fièvre qu'il a 39, simplement pour renforcer le signal qui lui est envoyé ?

pénaliseraient certains usages plus que de raison et feraient corrélativement bénéficier d'autres d'un avantage injustifié.

Les équilibres économiques sont sensibles : on voit bien qu'en adoptant pour le calcul en énergie primaire de la consommation des logements des coefficients d'équivalence contestables, on a fait basculer l'équilibre entre formes

d'énergie dans des proportions inattendues et allant bien au-delà des objectifs initiaux.

**S'agissant du CO<sub>2</sub>, ne chargeons pas à nouveau de façon abusive la barque du kWh : à force d'être mal traité, on finira par croire que certains veulent réellement le maltraiter. ■**

**Jean-Pierre Hauet** est ancien rapporteur général de la Commission de l'Energie du Plan. Il a dirigé les Laboratoires de Marcoussis du groupe Alcatel-Alsthom et a été Chief Technology Officer du Groupe ALSTOM. Il est membre émérite de la SEE et président du comité éditorial de la REE. Il est l'auteur du livre « Comprendre l'énergie – Pour une transition énergétique responsable » paru aux éditions L'Harmattan en avril 2014.

### Le paradoxe du voyageur de Calais - (Maurice Allais - Prix Nobel d'économie 1988)



Cliché Harcourt

Maurice Allais pose la question de savoir « combien coûte un passager monté à Calais dans le train pour Paris ? »

- Un contrôleur estimera que la consommation de ressources supplémentaires n'est pas vraiment chiffrable, et sera tenté de répondre presque rien (coût marginal nul).
- Le chef de train sera plus mesuré : si soixante passagers font comme lui, il faut ajouter une voiture au train. Il sera donc tenté d'imputer 1/60<sup>e</sup> du coût de la voiture pendant le temps du transport.
- Le chef de ligne ne l'entend pas de cette oreille : on ne peut pas ajouter indéfiniment des voitures à un train, et au bout de 20 voitures il faut doubler celui-ci. Il souhaite donc imputer pour sa part, en plus du 1/60<sup>e</sup> de voiture précédent, 1/1 200<sup>e</sup> du prix de la motrice et du salaire de son conducteur.
- Le chef de réseau n'est pas du tout d'accord : on ne peut pas multiplier ainsi les trains sans risque sur une même voie, et à partir de 50 trains par jour il est obligé de doubler la voie. Il ajoute donc pour sa part 1/120 000<sup>e</sup> du coût de la voie (toujours rapporté au temps du transport).

Maurice Allais montre ainsi que par approximations successives on arrive à ce que doit être le coût minimal du billet pour que la compagnie ferroviaire ne se retrouve jamais dans une impasse. Cet exemple lui est associé sous le nom de métaphore du voyageur de Calais, qui illustre qu'on ne peut jamais vraiment parler du coût d'un bien ou d'un service, mais qu'il est plus exact de parler de coût d'une décision en indiquant à quel niveau on la considère.

*Texte repris de Wikipedia*

Encadré 3 : Le paradoxe du voyageur de Calais.