

Indices de consommation électrique pour les services généraux d'immeuble et évaluation de gisements de «négawatts»

FABRIZIO CARLEVARO*, **

JEAN-LUC BERTHOLET**

1. INTRODUCTION

Cette contribution résume la méthodologie et les résultats d'une étude réalisée par un groupe pluridisciplinaire¹ mandaté par l'Office cantonal de l'énergie de Genève. L'étude vise à la mise au point d'un «indice électrique» pour évaluer les prestations de l'électricité dans un immeuble dans un domaine particulièrement intéressant pour le gisement d'économie qu'il offre, à savoir: les services généraux d'immeuble, c'est-à-dire les prestations destinées à l'ensemble des habitants de l'immeuble (éclairage de locaux communs, appareils de buanderie, ascenseurs, ventilation mécanique, etc.). Le but de l'étude était de développer un indice électrique unique, comparable à l'indice de chaleur, mesuré en méga-joules par m², largement accepté et appliqué par les milieux professionnels de l'énergie pour évaluer la qualité thermique d'un immeuble. L'élaboration d'une telle mesure unique de l'efficacité électrique est apparue inadaptée à la grande diversité des usages de l'électricité pour les services généraux d'immeuble. Dans ces conditions, le projet a été réorienté vers l'élaboration d'un ensemble complet d'indices de performance électrique: un pour chaque type de service général.

D'un point de vue méthodologique, notre étude est une tentative d'élaboration d'une procédure de mesure indirecte des deux composantes d'un indice de consommation d'électricité, soit, d'une part, la consommation d'électricité pour une prestation donnée et, d'autre part, la quantité de prestations fournies par cette consommation. Nous évaluons ces composantes par une décomposition de la consommation totale d'électricité lue au compteur, réalisée avec un modèle de régression à coefficients aléatoires, et par un modèle de mesure des prestations de l'électricité qui utilise des indicateurs de prestations électriques relevés dans l'immeuble.

* Département d'économétrie, Université de Genève, Uni-Mail, CH-1211 Genève 4, Fax +41 (22) 705 82 99, e-mail fabrizio.carlevaro@metri.unige.ch

** Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE), Université de Genève, 19, avenue de la Jonction, CH-1205 Genève, Fax +41 (22) 705 72 00, e-mail Jean-Luc.Bertholet@cuepe.unige.ch

1. Le Groupe d'Etude pour un Nouvel Indice Electrique (GENIE) est constitué d'ingénieurs consultants, connaissant la problématique pratique du terrain, et de chercheurs universitaires, chargés du développement des modèles théoriques. Une présentation complète de la méthodologie et des résultats du projet figure dans GENIE (1996).

L'estimation du modèle statistique de mesure des prestations de l'électricité s'appuie sur la méthode du maximum de vraisemblance et débouche simultanément sur l'estimation d'un modèle décrivant la distribution de l'indice électrique correspondant dans la population d'immeubles enquêtée. La quantification de ces distributions rend possible l'élaboration d'un diagnostic de la performance électrique d'un immeuble basé sur la comparaison de la valeur de ses indices électriques partiels à une valeur «cible» déduite de la distribution des ces indices dans la population de référence.

Dans ce qui suit, nous présentons ces problématiques en cinq sections correspondant aux différentes étapes de l'étude pluridisciplinaire GENIE, à savoir:

- la constitution d'un échantillon d'immeubles;
- la récolte de données de consommation et de fournitures de prestations de l'électricité;
- la décomposition statistique de la consommation d'électricité relevée au compteur par catégorie de prestations;
- la spécification et l'estimation d'indices de consommation électrique par catégorie de prestations;
- l'application des indices électriques partiels à l'élaboration d'un diagnostic d'efficacité électrique d'un immeuble fondé sur les meilleures pratiques observées.

2. CONSTITUTION DE L'ÉCHANTILLON

Notre étude vise à obtenir des résultats représentatifs pour une population de référence, en l'occurrence celle des immeubles du canton de Genève. C'est pourquoi nous avons fondé nos investigations sur un échantillon aléatoire d'immeubles tiré à partir du fichier des clients de l'entreprise de distribution d'électricité qui alimente l'ensemble du canton de Genève (Services industriels de Genève – SIG).

L'unité d'échantillonnage est constituée par le point de fourniture électrique tel qu'il est défini par l'entreprise de distribution pour gérer ses clients. Cela ne représente pas toujours un immeuble au sens habituel, car on y trouve également des points de fourniture comme des tunnels, des postes de transformation, des parkings, etc. Ainsi, afin d'être efficaces, nous avons restreint notre population de référence à deux genres d'immeubles.

- Les immeubles de logement pur, c'est-à-dire les immeubles à vocation résidentielle dans lesquels ne se déroule aucune activité économique. Ces immeubles sont toujours équipés d'un compteur électrique enregistrant la consommation des services généraux d'immeuble.
- Les immeubles dédiés tout ou en partie aux activités économiques tertiaires fortement consommatrices d'électricité à Genève, c'est-à-dire des immeubles dont le plus gros consommateur d'électricité appartient à l'un des cinq groupes d'activités économiques suivants: commerces de détail, hôtels et restaurants, banques et assurances, écoles, administrations publiques et organisations internationales. Certains de ces bâtiments sont partiellement résidentiels et sont donc également équipés d'un

«compteur services généraux». Ces bâtiments ont été classifiés à la fois dans la catégorie des immeubles commerciaux, afin d'étudier la consommation électrique vouée à l'activité économique principale qui s'y déroule, et dans la catégorie des immeubles résidentiels, afin d'en étudier la consommation enregistrée par le compteur services généraux dédiée essentiellement à la partie résidentielle de ce même bâtiment.

Pour l'année de base de notre étude (1991), les immeubles de logement pur représentent 16% du nombre total d'immeubles enregistrés dans le fichier des clients des SIG (environ 28 000) et les immeubles abritant des activités économiques tertiaires fortement consommatrices d'électricité, comme définis ci-dessus, se chiffrent à presque 11%.

Notre plan d'échantillonnage de chacune des sous-populations a cherché à obtenir la plus grande diversité des équipements électriques des services généraux. Pour les immeubles de logement pur, nous avons fondé notre stratification sur deux variables de contrôle, soit la consommation totale de l'immeuble et la part des services généraux dans ce total. En ce qui concerne les activités économiques des cinq sous-populations du tertiaire, seule la première variable de contrôle a été utilisée, car la deuxième n'était pas toujours présente. En conséquence de la relativement petite taille de l'échantillon que le budget autorisait (environ 200 immeubles), le nombre de strates par variables de contrôle a été limité à trois. Nous avons choisi les limites de strates en recherchant une égale variabilité dans chaque strate.

Enfin, nous avons décidé de choisir le même nombre d'immeubles dans chaque sous-population, soit 36, et de les répartir en proportions égales dans chaque strate. Le tirage aléatoire de l'échantillon a été fait avec une marge de sécurité de 300% pour pallier les non-réponses.

L'échantillon final que nous avons pu utiliser diffère légèrement de ce plan de sondage. Il se compose de 38 immeubles de logement pur et de 126 immeubles à vocation commerciale, dont 55 sont à usage mixte. L'échantillon des écoles n'a pas été tiré aléatoirement, car nous nous sommes appuyés sur une étude antérieure mandatée par l'Office cantonal de l'énergie.

3. SOURCES D'INFORMATION ET DONNÉES

La mise au point de l'échantillon d'immeubles et d'entreprises s'est déroulée en trois étapes. Tout d'abord, une fois l'autorisation obtenue auprès des propriétaires d'immeuble ou des entreprises, les SIG ont extrait de leur fichier la consommation correspondante de l'année 1991.

A la seconde étape, une enquête dans les immeubles et les entreprises de l'échantillon a permis de recenser l'ensemble des équipements. Le questionnaire enregistrait les caractéristiques des équipements électriques, en particulier leur puissance nominale et leur durée d'utilisation, si elle était connue, ainsi que des caractéristiques portant sur l'architecture et les activités économiques du bâtiment, telles que l'orientation des façades, le

niveau de bruit, le nombre d'étages, la surface au sol, la répartition des surfaces selon le type d'activité, etc.

À la troisième étape, on a effectué quelques mesures «in situ» afin d'améliorer la qualité des informations recueillies par questionnaire. Ces mesures ont été faites, pendant une semaine, sur un seul équipement ou un groupe d'équipements homogènes assurant une même prestation. Elles ont ensuite été converties en données annuelles par extrapolation. Dans quelques immeubles, ces mesures furent répétées sur d'autres périodes de l'année afin d'évaluer des variations dues au changement de saison ou aux vacances.

Dans le but de calculer la consommation d'électricité d'un équipement à partir des informations récoltées lors de l'enquête, soit la puissance nominale et la durée d'utilisation, nous avons dû quantifier plusieurs coefficients techniques, à savoir :

- des facteurs de conversion de la puissance nominale à la puissance maximale;
- des facteurs de conversion de la puissance maximale à la puissance moyenne;
- des facteurs de simultanéité évaluant la puissance maximale appelée par un groupe d'équipements connectés sur le même circuit.

Certains de ces coefficients proviennent de documents techniques et d'autres sont issus des mesures «in situ» de quelques immeubles de l'échantillon.

4. DÉCOMPOSITION STATISTIQUE DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ RELEVÉE AU COMPTEUR PAR CATÉGORIE DE PRESTATIONS

L'élaboration d'indices partiels repose sur les consommations d'électricité par prestation des immeubles de logements et de services. Dans ce dessein, nous avons réuni les prestations en groupes principaux relativement homogènes dont nous présentons ici la nomenclature pour les immeubles de logements purs et mixtes seulement:

- éclairage des locaux communs (halls, escaliers, caves, circulations, garages, etc.);
- appareils de buanderie (lave-linge, sèche-linge, essoreuses, déshumidificateurs);
- ascenseurs et monte-charges (en incluant la ventilation de ces installations);
- installations de chaufferie (appareillages électriques des chaufferies, soit uniquement les brûleurs et circulateurs car le chauffage électrique des immeubles de logement est inexistant à Genève);
- ventilation mécanique, tant des locaux que des garages;
- équipements divers (équipements mal identifiés ou marginaux).

Pour évaluer la part de la consommation d'électricité lue au compteur consacrée à chacun de ces groupes de prestations, nous avons utilisé le modèle suivant de HILDRETH et HOUCK (1968):

$$y_i = \sum_{k=1}^K \beta_{ki} x_{ki} \quad (1)$$

où y_i désigne la consommation annuelle d'électricité relevée au compteur de l'immeuble i , x_{ki} un indicateur de la taille de l'équipement pour la prestation de type k observé dans l'immeuble i (principalement la puissance nominale ou, lorsque cet indicateur est inconnu, le nombre d'appareils) et β_{ki} un indicateur aléatoire non observé de l'intensité d'utilisation de cet équipement (durée annuelle normalisée de fonctionnement ou consommation annuelle d'électricité par appareil). Ainsi :

$$y_{ki} = \beta_{ki} x_{ki} \quad (2)$$

exprime la consommation annuelle d'électricité non observée qui est consacrée à la fourniture de la prestation de type k dans l'immeuble i . Dans les cas particuliers où le temps de fonctionnement β_{ki} a pu être observé, nous avons calculé les consommations électriques y_{ki} correspondantes et les avons ajoutées à l'échantillon comme s'il s'agissait d'immeubles fictifs.

En symbolisant par β_k et ω_k^2 , l'espérance mathématique et la variance des paramètres aléatoires β_{ki} , respectivement, et en postulant une corrélation nulle entre ces paramètres aléatoires tant pour le même immeuble i que pour des immeubles différents, on peut estimer de façon efficace les consommations électriques inconnues y_{ki} en introduisant dans la formule (2) le prédicteur linéaire efficace de GRIFFITHS (1972) pour β_{ki} . On obtient le prédicteur suivant pour y_{ki} :

$$\hat{y}_{ki} = \hat{\beta}_k x_{ki} + \frac{\omega_k^2 x_{ki}^2}{\sum_{\ell=1}^K \omega_{\ell}^2 x_{\ell i}^2} (y_i - \sum_{\ell=1}^K \hat{\beta}_{\ell} x_{\ell i}) \quad (3)$$

où $\hat{\beta}_k$ est le meilleur estimateur linéaire sans biais pour β_k , c'est-à-dire l'estimateur des moindres carrés généralisés pour les paramètres du modèle de régression linéaire hétéroscédastique dérivé du modèle linéaire à coefficients aléatoires (1).

Ce prédicteur impose l'additivité et l'invariance, soit :

$$\sum_{k=1}^K \hat{y}_{ki} = y_i \quad \text{et} \quad \hat{y}_{ki} = y_k \quad \text{pour un immeuble fictif.} \quad (4)$$

Son inconvénient majeur tient au fait que des valeurs négatives de $\hat{y}_{ki}$ sont possibles. Lorsque de telles valeurs aberrantes ont été obtenues, nous les avons éliminées de notre analyse.

Ajoutons pour être complets, que les variances inconnues ω_k^2 ont été estimées par un estimateur convergent qui s'inspire d'une procédure d'estimation utilisée par FIEBIG, BARTELS, AIGNER (1991). Cet estimateur et la démonstration de sa convergence en probabilité sont présentés dans GENIE (1996), annexe 3.1.

5. SPÉCIFICATION ET ESTIMATION D'INDICES DE CONSOMMATION ÉLECTRIQUE PAR CATÉGORIE DE PRESTATIONS

Par référence au concept bien établi d'indice de consommation énergétique², nous définissons un indice de consommation électrique partielle comme le rapport de la consommation d'électricité pour une certaine prestation sur la quantité de prestations fournie par l'équipement en question, soit formellement:

$$I_{ki} = \hat{y}_{ki} / Q_{ki} \quad (5)$$

où Q_{ki} représente la quantité non observable de prestations de type k dans l'immeuble i .

Pour évaluer ces quantités, nous avons spécifié un modèle de mesure permettant d'agréger des services communs de même type, mais qui se différencient cependant par leur «qualité». Cette procédure d'agrégation est nécessaire pour prendre en compte l'hétérogénéité des services électriques, comme, par exemple, la différenciation de l'éclairage des surfaces communes selon leur usage spécifique, ou, encore, les différentes températures de l'eau de lavage selon la qualité des tissus.

Nous pratiquons cette agrégation en appliquant une échelle d'équivalence. Selon ce principe, les différentes qualités d'une même prestation peuvent être additionnées après pondération par un coefficient proportionnel au contenu qualitatif du service, par exemple, l'intensité d'éclairage par mètre carré pour le service d'éclairage des zones communes. Bien sûr, ces coefficients peuvent être considérés comme des constantes, mais ils peuvent également varier d'un immeuble à l'autre en fonction des caractéristiques particulières des immeubles; par exemple, la présence d'une baie vitrée apportant de l'éclairage naturel restreint les besoins en éclairage artificiel et, donc, diminue d'autant le coefficient de pondération de la surface qui en bénéficie. Formellement, nous écrivons:

$$Q_{ki} = \sum_{h=1}^H \gamma_{ki}^h Q_{ki}^h \quad \text{avec} \quad \gamma_{ki}^h = \gamma_k^h \prod_{\ell=1}^L (1 + \delta_k^{\ell} X_{ki}^{\ell}) \quad (6)$$

où Q_{ki}^h représente la quantité de prestations de type k et de qualité h fournie dans l'immeuble i , X_{ki}^{ℓ} , $\ell=1, \dots, L$, les caractéristiques de l'immeuble influençant l'échelle d'équivalence, γ_k^h , $h=1, \dots, H$, les valeurs inconnues de cette échelle correspondant à une valeur nulle des caractéristiques précédentes³, et δ_k^{ℓ} les paramètres inconnus traduisant la réaction des coefficients de l'échelle d'équivalence à un changement des caractéristiques X_{ki}^{ℓ} .

2. Cf. GUIBAN et alii (1991).

3. Les paramètres γ_k^h sont normalisés en égalisant l'un d'entre eux à un. Ce choix arbitraire détermine l'unité de mesure de l'agregat de prestations Q_{ki} .

Pour estimer les paramètres γ_k^h et δ_k^c , nous supposons l'existence d'une distribution théorique de chaque indice partiel I_{ki} dans la population de référence d'où est tiré l'échantillon d'immeubles. En choisissant une forme fonctionnelle paramétrique pour ces fonctions de distribution, soit $f(I_k; \theta_k)$, où θ_k est le vecteur de paramètres inconnus de la fonction de densité spécifiée pour l'indice partiel I_k , il devient aisé de développer une estimation simultanée de ces paramètres avec ceux du modèle (6).

Dans ce but, nous avons appliqué le principe du maximum de vraisemblance en faisant l'hypothèse que les $\hat{y}_{ki}$, $i = 1, \dots, N$ sont indépendants. Grâce à cette simplification, le logarithme de la fonction de vraisemblance de l'échantillon des consommations électriques estimées pour les services généraux de type k s'écrit:

$$\log L(\gamma_k, \delta_k, \theta_k) = \sum_{i=1}^N \left\{ \log f\left(\frac{\hat{y}_{ki}}{Q_{ki}}\right) - \log Q_{ki} \right\}, \quad (7)$$

avec Q_{ki} défini par la forme fonctionnelle (6).

L'application de cette méthode d'estimation à la nomenclature des services généraux des immeubles résidentiels présentée à la section 4 nous a conduits à une série de propositions pour définir les indices de performance électrique. Comme illustration, nous présentons dans les tableaux 1 et 2 nos résultats obtenus en appliquant les principes de sélection suivants:

- l'utilisation d'un petit nombre de variables à récolter par questionnaire pour refléter les services généraux;
- la priorité aux variables qui sont stables dans le temps (par exemple nous avons choisi le nombre de pièces d'habitation plutôt que le nombre d'habitants de l'immeuble, qui peut fluctuer sensiblement au cours du temps);
- le rejet de variables conduisant à des estimations des paramètres de l'échelle d'équivalence incohérents du point de vue physique;
- la préférence à la fonction de densité d'un indice de performance électrique conduisant à la plus forte concentration, mesurée par le coefficient de variation théorique de la population mère.

Tableau 1: Spécification et estimation des modèles de mesure des prestations de l'électricité pour les «services généraux» des immeubles de logement

<i>Catégories de prestations</i>	<i>Modèle de mesure des prestations¹</i>
1. Eclairage principal	$[Q^1 + 4.36Q^2] [1 - 0.61X^1] + Q^3$ (3.31) (0.07)
2. Appareils de buanderie	$Q^4 [1 + 1.19X^2] [1 + 0.95X^3]$ (1.29) (0.97)
3. Ascenseurs et monte-charges	$Q^5 [1 + 1.25X^4] [1 + 2.17X^5]$ (1.12) (2.53)
4. Installations de chaufferie	Q^6
5. Ventilation mécanique	$Q^7 [1 + 0.45X^6] [1 + 0.38X^3]$ (0.98) (0.68)
6. Appareils et installations diverses	$Q^6 + 2.28Q^8$ (1.11)

¹ Les chiffres entre parenthèses rondes sont les écart-types asymptotiques estimés. Légende:

Q^1 surface du hall d'entrée en m ²	$X^2 = \begin{cases} 1 & \text{si la taille moyenne des} \\ & \text{appartements de l'immeuble} \\ & \text{est supérieure à 2.5} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
Q^2 surface des escaliers en m ²	
Q^3 surface des circulations en m ²	$X^3 = \begin{cases} 1 & \text{si l'immeuble est en} \\ & \text{loyer libre ou en} \\ & \text{propriété par étages} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
Q^4 nombre de pièces d'habitation de l'immeuble	
Q^5 nombre d'étages de l'immeuble	X^4 nombre moyen de pièces des appartements de l'immeuble, excédant le studio
Q^6 surface énergétique de référence des locaux d'habitation en m ²	X^5 part de la surface de l'immeuble utilisée par des activités économiques
Q^7 nombre de pièces d'habitation de l'immeuble	X^6 nombre d'étages de l'immeuble
Q^8 surface énergétique de référence des locaux professionnels en m ²	
$X^1 = \begin{cases} 1 & \text{si présence d'une cage d'escalier vitrée en façade} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	

Tableau 2: Estimation des paramètres et des caractéristiques de la distribution des indices électriques partiels pour les «services généraux» des immeubles de logement

<i>Catégories de prestations</i>	<i>Paramètres de la distribution¹</i>			<i>Caractéristiques de la distribution</i>	
	<i>b</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Coefficient de variation</i>
1. Eclairage principal	4000	2.500 (0.44)	448.00 (360)	22.20	0.630
2. Appareils de buanderie	3000	1.030 (0.29)	42.30 (28.3)	71.30	0.963
3. Ascenseurs et monte-charges	2800	0.812 (0.195)	6.08 (5.67)	329.70	0.974
4. Installations de chaufferie	50	1.353 (0.670)	8.74 (3.83)	6.70	0.763
5. Ventilation mécanique	600	0.614 (0.214)	11.50 (22.7)	30.40	1.195
6. Appareils et installations diverses	100	0.865 (0.165)	23.10 (6.1)	3.62	1.034

¹ Forme analytique de la distribution beta: $\frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} b^{p+q-1} I^{p-1} (b-I)^{q-1}$

avec $0 \leq I \leq b$ valeur de l'indice électrique partiel
 $b > 0$ paramètre fixé par tâtonnement
 $p > 0, q > 0$ paramètres estimés

Les chiffres entre parenthèses sont les écart-types asymptotiques estimés.

6. ANALYSE DES MEILLEURES PRATIQUES D'UTILISATION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES BÂTIMENTS

Parmi les nombreuses applications des indices électriques, le groupe multidisciplinaire GENIE a développé un diagnostic énergétique d'un immeuble fournissant aux responsables de sa gestion des informations leur permettant d'apprécier le potentiel et l'intérêt d'interventions sur le bâtiment visant à améliorer son efficacité énergétique.

Une telle évaluation doit pouvoir être répétée régulièrement car, d'une part, les besoins en prestations énergétiques d'un bâtiment changent dans le temps, au gré des

modifications qui se produisent dans les activités qu'il abrite, et, d'autre part, de nouvelles technologies fournissant les prestations exigées par les utilisateurs d'un immeuble avec un meilleur rendement énergétique apparaissent régulièrement sur le marché. Cette exigence implique la mise au point d'un diagnostic rapide et fournissant des informations directement interprétables par les responsables de la gestion de l'immeuble. En particulier, cette information doit permettre de situer l'immeuble évalué par rapport aux «meilleurs» immeubles du parc ayant la même fonction économique dans le double but de dégager un niveau de performance énergétique à atteindre (valeurs «cibles»), et d'identifier des bâtiments existants pouvant servir de modèle dans une procédure de «benchmarking» visant à préciser concrètement les interventions à réaliser pour atteindre les objectifs fixés.

La méthode de diagnostic que nous proposons procède en cinq étapes.

- Relevé in situ des données nécessaires au calcul des consommations électriques annuelles des «services généraux» par groupe de consommateurs et des prestations correspondantes.
- Calcul par les modèles présentés dans les sections 4 et 5 de ces consommations électriques et de leurs prestations afin d'en déduire les valeurs des indices électriques par type de prestation.
- Positionnement qualitatif de l'immeuble dans la population de référence par l'évaluation de la proportion d'immeubles dont les indices électriques sont inférieurs aux valeurs observées pour l'immeuble analysé.
- Positionnement quantitatif de l'immeuble dans la population de référence par comparaison des indices électriques de l'immeuble à des valeurs cibles et évaluation des économies potentielles d'électricité qui en découlent.
- Validation du diagnostic qualitatif ou quantitatif par une expertise d'ingénieurs des équipements de l'immeuble.

Dans ce qui suit, nous présentons les trois dernières étapes de cette méthode sur la base d'un immeuble ne faisant pas partie de l'échantillon de bâtiments constitué pour les besoins de l'étude. Il s'agit d'un immeuble à usage mixte équipé d'un compteur «services généraux» que l'on nommera par son adresse à Genève, soit la «rue du Cendrier 24».

Un positionnement qualitatif de cet immeuble dans la population de référence peut être réalisé par le calcul de la proportion d'immeubles de cette population dont les indices partiels ont une valeur inférieure ou égale à celle observée pour l'immeuble considéré. Selon que cette proportion s'avère supérieure ou inférieure à une valeur cible, on pourra en déduire qu'il y a intérêt ou non à approfondir l'analyse énergétique de l'immeuble dans la perspective de déceler des gisements de «négawatts».

Ce calcul peut être réalisé en considérant, tour à tour, la distribution marginale de chaque indice partiel, c'est-à-dire en se référant à la valeur observée d'un indice partiel donné indépendamment des valeurs observées pour les autres indices partiels. Pour l'indice partiel I_k , cette proportion est obtenue en intégrant la fonction de densité de cet indice dans la population de référence, soit $f_k(I_k)$, jusqu'à la valeur observée I_k dans l'immeuble analysé, soit formellement:

$$P \{ I_k \leq I_k^{\text{obs}} \} = \int_0^{I_k^{\text{obs}}} f_k(I_k) dI_k \quad (8)$$

Les résultats de ce calcul pour l'immeuble «rue du Cendrier 24» sont présentés dans le tableau 3. On constate que les installations pour l'«Éclairage principal» et celles pour la «Ventilation mécanique» sont peu efficaces car leurs indices électriques partiels respectifs sont supérieurs aux valeurs médianes dans la population de référence. Plus précisément, on trouve, dans cette dernière, une proportion d'immeubles plus performants en matière d'«Éclairage principal» et de «Ventilation mécanique» de 65% et 52%, respectivement. Pour les autres installations et appareils électriques, en revanche, ces proportions se situent entre 30% et 38%, ce qui implique des indices électriques partiels compris entre le premier quartile et la médiane.

Tableau 3: Proportion d'immeubles de la population de référence ayant un indice électrique inférieur ou égal à la valeur observée dans l'immeuble «rue du Cendrier 24»

Eclairage principal	.65
Appareils de buanderie	.31
Ascenseurs et monte-charges	.35
Installations de chaufferie	.38
Ventilation mécanique	.52
Equipements divers	—

Le positionnement d'un immeuble dans sa population de référence peut se faire aussi en prenant en considération simultanément plusieurs indices partiels voire l'ensemble de ces indices électriques. Ce calcul, toutefois, s'appuie sur la distribution conjointe des indices pris en considération, laquelle n'a pas fait l'objet d'une détermination dans notre étude.

Le diagnostic qualitatif de l'immeuble, dont on vient d'expliquer la procédure, peut être complété par un diagnostic quantitatif fondé sur l'adoption d'indices «cibles» envisagés comme des objectifs quantitatifs à atteindre par des interventions sur l'immeuble. Pour réaliser un tel diagnostic sur l'immeuble «rue du Cendrier 24», notre choix de ces valeurs «cibles» s'est porté sur les fractiles des distributions des indices partiels qui sont présentés dans le tableau 4. On reviendra dans notre conclusion sur ce choix pour préciser qu'elle est, à nos yeux, le critère pertinent à utiliser pour définir de tels indices «cibles».

Une fois choisis les indices «cibles», on recalcule la consommation d'électricité de l'immeuble en appliquant ces indices aux quantités de prestations fournies par les équipements électriques recensés dans l'immeuble, du moins lorsque les indices «cibles» sont inférieurs aux indices de l'immeuble. La consommation annuelle d'électricité recalculée, pour le groupe de consommateurs k , résulte ainsi de la formule suivante:

$$y_k^C = Q_k \text{Min} \{ I_k; I_k^C \} \quad (9)$$

où Q_k désigne la quantité de prestations, I_k l'indice électrique partiel actuel et I_k^C sa valeur «cible». Quant à la consommation d'électricité recalculée pour l'ensemble des «services généraux» de l'immeuble, elle découle de la simple addition de ces consommations électriques partielles.

L'évaluation de ces consommations électriques «cibles» pour l'immeuble envisagé permet son positionnement quantitatif dans la population de référence ainsi que le calcul des gisements potentiels d'économies d'électricité dans les «services généraux» de l'immeuble (différence entre les consommations électriques actuelles de l'immeuble et les consommations «cibles»).

Tableau 4: Fractiles des indices électriques partiels dans la distribution de la population de référence de type beta (en kWh/an par unité de prestation¹)

Proportions	Fractiles I_k^C					
$P\{I_k \leq I_k^C\}$	Eclairage principal	Appareils de buanderie	Ascenseurs et monte-charges	Installations de chaufferie	Ventilation mécanique	Equipements divers
0.10	7.18	8.11	25.88	1.28	1.07	0.30
0.20	10.43	16.83	63.07	2.27	3.37	0.70
0.25	11.91	21.56	84.83	2.77	4.92	0.92
0.30	13.36	26.58	108.73	3.27	6.74	1.17
0.40	16.26	37.71	163.56	4.33	11.29	1.74
0.50	19.35	50.76	229.61	5.50	17.25	2.42
0.75	29.42	99.52	478.54	9.43	42.85	5.08
0.90	40.95	162.37	783.73	13.86	79.04	8.59

¹ Les unités de mesure des prestations adoptées sont :

Catégories de prestations

Eclairage principal

Appareils de buanderie

Ascenseurs et monte-charges

Installations de chaufferie

Ventilation mécanique

Appareils et installations divers

Unité de mesure

m² éclairé de surface hall d'entrée ou circulations dans un immeuble sans cage d'escalier vitrée en façade

pièce d'habitation dans un immeuble HLM ou HCM dont la taille moyenne des appartements est inférieure à 2 1/2 pièces

étage desservi dans un immeuble de logement pur de studios

m² de surface énergétique (chauffée) de référence pièce d'habitation dans un immeuble HLM ou HCM entièrement sur rez

m² de surface énergétique (chauffée) de référence dans un immeuble de logement pur

Pour l'immeuble «rue du Cendrier 24», nous avons opté, à titre purement illustratif, pour des indices «cibles» reflétant, d'une part, le premier quartile de la distribution d'immeubles de logement du canton de Genève, d'autre part, les caractéristiques énergétiques d'un immeuble réel permettant une confrontation sur le terrain («benchmarking»). Il s'agit de l'immeuble de l'échantillon dont les indices partiels sont les plus proches du premier quartile, que l'on désignera par son adresse aux «Grandes Communes».

Les comparaisons des indices de l'immeuble «rue du Cendrier 24» avec les indices «cibles» choisis sont présentées dans le tableau 5. Elles font apparaître des économies d'électricité possibles dans l'«Eclairage principal», les «Ascenseurs et monte-charges» ainsi que dans la «Ventilation mécanique». Les indices électriques des «Installations de chaufferie» et des «Appareils de buanderie» de l'immeuble analysé sont, en revanche, inférieurs aux indices correspondants de l'immeuble des «Grandes Communes».

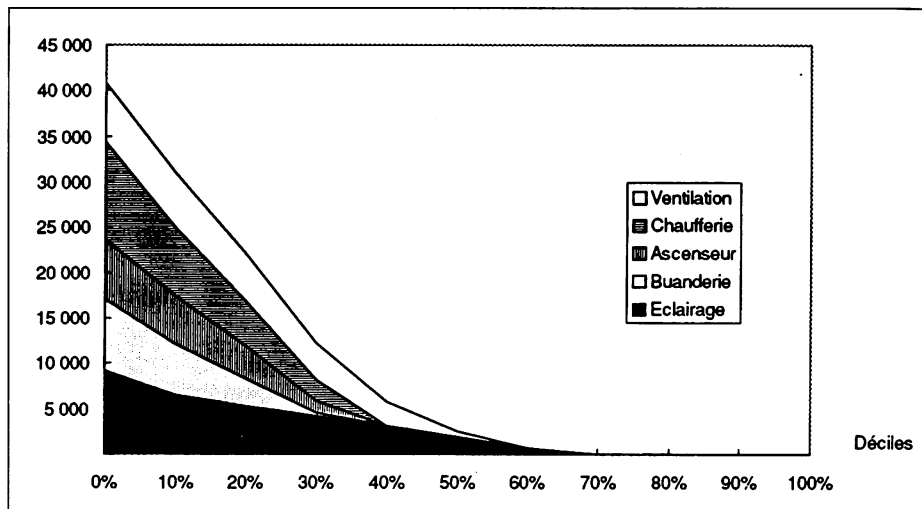
Le tableau 5 présente également les potentiels d'économies d'électricité en kWh/an ainsi qu'en pour cent de la consommation actuelle de l'immeuble. Ces résultats mettent en évidence un potentiel d'économie considérable, pouvant atteindre pour l'ensemble des «services généraux» 40 pour-cent de la consommation actuelle. Par ordre d'importance, en pourcentage de la consommation actuelle de l'immeuble, les économies potentielles apparaissent dans la «Ventilation mécanique», l'«Eclairage principal», les «Ascenseurs et monte-charges», les «Installations de chaufferie» et les «Appareils de buanderie». Le classement selon le nombre absolu de kWh/an d'économie change quelque peu cet ordre: l'«Eclairage principal» passe au premier rang tandis que les «Installations de chaufferie» précèdent les «Ascenseurs et monte-charges».

Pour évaluer la robustesse de ces conclusions, nous avons complété ce diagnostic fondé sur le choix d'une seule valeur pour les indices «cibles» par une analyse de sensibilité dans laquelle on a aligné les indices partiels de l'immeuble testé sur des objectifs dont on a changé successivement les valeurs. La figure 1 présente la sensibilité des économies potentielles d'électricité par groupes de consommateurs en fonction d'indices «cibles» variant selon les déciles de la population genevoise d'immeubles de logement.

La validation des potentiels d'économie d'électricité mis en évidence par le diagnostic qualitatif ou quantitatif implique une expertise d'ingénieurs de la qualité énergétique et du fonctionnement des équipements de l'immeuble visant à identifier les interventions réalisables sur ces équipements pour réduire leur consommation électrique selon les objectifs fixés. Dans cette analyse il est utile de pouvoir s'appuyer sur un immeuble réel faisant état d'indices électriques partiels proches des valeurs «cibles» retenues comme objectifs à atteindre. Il est alors possible de comparer concrètement les équipements de l'immeuble diagnostiqué avec ceux d'une tel immeuble de «contrôle» pour vérifier le bien fondé des économies d'électricité mises en évidence par un calcul basé sur des valeurs «cibles».

L'efficacité de cette démarche de «benchmarking» a été testée sur l'immeuble «rue du Cendrier 24» en comparant ses caractéristiques énergétiques à celles de l'immeuble situé aux «Grandes Communes».

Figure 1: Economies potentielles d'électricité réalisables dans l'immeuble «rue du Cendrier 24» selon la valeur des indices «cibles»



Une comparaison des appareils et des installations électriques présentes dans l'immeuble des «Grandes Communes» avec les équipements de l'immeuble de la «rue du Cendrier 24» a permis de déceler rapidement les raisons techniques des écarts de rendement énergétique constatés entre ces immeubles pour trois groupes de consommateurs.

- Pour l'ascenseur, l'immeuble «rue du Cendrier 24» est équipé d'un système de renvoi automatique au rez-de-chaussée, ce qui a pour effet de plus que doubler la longueur des parcours pour une prestation donnée et, par voie de conséquence, d'augmenter proportionnellement la consommation d'électricité par rapport à un ascenseur conventionnel, comme celui dont est équipé l'immeuble «Grandes Communes».
- L'écart de rendement dans l'éclairage s'explique par la présence de murs très sombres (peints en brun) dans le hall et l'escalier de l'immeuble «rue du Cendrier 24» alors que dans l'immeuble «Grandes Communes» ces murs sont clairs. On constatera que l'indice de l'éclairage est moins performant à la «rue du Cendrier 24» (malgré l'utilisation d'ampoules à basse consommation d'énergie) que l'indice de l'immeuble des «Grandes Communes» (pourtant doté d'ampoules à incandescence).
- Quant aux appareils de buanderie, ils sont plus anciens dans l'immeuble «rue du Cendrier 24» que dans celui des «Grandes Communes»; cependant les «Grandes Communes» disposent d'un équipement plus complet (lave-linge et sèche-linge). La ressemblance des indices pourrait ainsi découler de la compensation entre le niveau d'équipement et leur qualité énergétique.

Tableau 5: Comparaison des consommations électriques pour les «services généraux» de l'immeuble «rue du Cendrier 24» à des consommations «cibles» reflétant le premier quartile des indices partiels dans la population genevoise d'immeubles de logement									
Catégories de prestation	Indices électriques partiels			Consommation d'électricité (kWh/an)		Economies d'électricité selon indices «cibles»			
	Rue du Cendrier 24	Grandes Communes	Premier quartile	Rue du Cendrier 24	Grandes Communes	Premier quartile	Grandes Communes	%	Premier quartile kWh/an
Eclairage principal	24.88	15.30	11.91	9233	5678	4420	3555	38.5	4813
Appareils de buanderie	27.45	(27.54)	21.56	7736	7736	6077	0	0.0	1659
Ascenseurs et monte-charges	136.69	57.39	84.83	6566	2757	4075	3809	58.0	2491
Installations de chauffage	4.16	(5.20)	2.77	10929	10929	7285	0	0.0	3644
Ventilation mécanique	18.81	3.82	4.92	6339	1287	1658	5052	79.7	4681
Total				40803	28387	23515	12416	30.4	17288

Les valeurs entre parenthèses ne sont pas retenues comme indices «cibles»

Pour les installations de chauffage et de ventilation mécanique une telle comparaison n'a pas été entreprise. Néanmoins, après visite des installations de ventilation de l'immeuble «rue du Cendrier 24», nous avons constaté que les horloges de passage de petite à grande vitesse sont complètement dérégées (sur les quatre horloges, aucune n'est calibrée sur la même heure, avec des écarts allant jusqu'à 3 heures). De plus, le volume d'extraction d'air pour les différents locaux nous semble un peu excessif, ceci en comparaison avec les volumes d'air à extraire selon la recommandation de la Société suisse des ingénieurs et architectes (norme SIA 380/4).

7. CONCLUSION

Cette recherche s'est voulue dès le début pluridisciplinaire en associant des experts en électricité (les bureaux d'ingénieurs) et des économètres chargés de la planification de l'enquête et de l'analyse statistique des données. Cette démarche a permis la mise au point d'un ensemble d'indices de consommation électrique par prestations destinées aux services généraux des immeubles, crédibles pour les milieux professionnels concernés et ouvrant de multiples perspectives d'application pratique. Parmi ces applications, la plus intéressante, aux yeux des responsables chargés de la gestion de l'énergie dans les bâtiments, a semblé la mise au point d'un outil d'analyse simple et économique de la performance électrique d'immeubles.

Cet article présente l'approche que nous avons développée pour atteindre cet objectif. Rompant avec les démarches normatives largement implantées dans la pratique de la construction (en Suisse les normes SIA), notre approche évalue la performance non pas par rapport à des optima théoriques mais en s'appuyant sur les meilleures pratiques observées. Il en découle une évaluation plus réaliste des potentiels d'amélioration réalisables avec les moyens techniques connus et rodés.

Un premier test de notre procédure de diagnostic, effectué sur un immeuble de logements ne figurant pas dans l'échantillon qui a servi à établir les indices électriques utilisés dans le diagnostic, a fourni des résultats encourageants. En effet, une visite sur place a confirmé que des assainissements sont techniquement envisageables pour les catégories de consommateurs pour lesquels nos indices sont manifestement trop élevés.

De tels tests de validation sont actuellement en cours à Genève avec le soutien de l'Office cantonal de l'énergie. Le but est d'évaluer l'acceptabilité de l'outil par les milieux professionnels concernés, c'est-à-dire par les bureaux d'ingénieurs conseil. Il serait également souhaitable d'établir l'exportabilité de la méthode, qui a été quantifiée à Genève, à d'autres villes suisses ou étrangères.

Le présent article n'a pas abordé la problématique du choix de valeurs «cibles» pour nos indices de consommation électrique permettant d'évaluer les réductions de consommation d'électricité réalisables. Au plan méthodologique, notre projet de recherche se poursuit dans cette voie, par la définition d'une enveloppe (une par type de prestation) traduisant la consommation minimale d'électricité requise pour fournir la quantité de

prestations en services généraux exigée dans un immeuble donné. Nous disposerons ainsi de normes fondées sur les besoins en prestations des immeubles reflétant les meilleures réalisations existantes.

RÉFÉRENCES

- CARLEVARO, F. (1997). Measuring and Diagnosing the Efficiency of Electricity Services in Buildings, *Proceedings of the Conference on Statistical Science Honouring the Bicentennial of Stefano Francini's Birth, Monte Verità, Ascona (Switzerland)*, C. Mala-guerra, S. Morgenthaler, E. Ronchetti (eds), Birkhäuser Verlag, Basel, 1997, pp. 157–167.
- CARLEVARO, F., J.-L. BERTHOLET (1997). Diagnostic électrique des services généraux d'immeuble: Méthodologie et application au Canton de Genève, *Economie et économie de la construction. Actes définitifs du LV^{ème} Colloque international de l'Association d'économétrie appliquée, Neuchâtel, Suisse, 20–21 février 1997*, pp. 33–35.
- FIEBIG, D. G., R. BARTELS, D. J. AIGNER (1991). A Random Coefficient Approach to the Estimation of Residential End-Use Load Profiles, *Journal of Econometrics*, 50, pp. 297–327.
- GENIE – Groupe d'Etude pour un Nouvel Indice Electrique (1996). Etude de l'indice de consommation d'énergie électrique dans le secteur immobilier genevois, Rapport final à l'Office cantonal de l'énergie, Département des travaux publics et de l'énergie, République et canton de Genève.
- GUISAN, O., B. LACHAL, W. WEBER, eds (1991). *Indices électriques et bâtiments, Actes de la Journée du CUEPE 1991*, Série de publications du CUEPE No 47, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève.
- GRIFFITHS, W. E. (1972). Estimation of Actual Response Coefficients in the Hildreth-Houck Random Coefficient Model, *Journal of the American Statistical Association*, 67 (339), pp. 633–635.
- HILDRETH, C., J. P. HOUCK (1968). Some Estimators for a Linear Model with Random Coefficients, *Journal of the American Statistical Association*, 63, pp. 584–595.
- SIA – Société suisse des ingénieurs et architectes (1995). L'énergie électrique dans le bâtiment, recommandation 380/4.

RÉSUMÉ

En Suisse, la conservation de l'électricité a été inscrite comme l'une des priorités du Programme «Energie 2000», dans le but d'éviter tout accroissement du parc de centrales nucléaires. Un tel effort de conservation est concentré sur le domaine bâti qui semble disposer de nombreux gisements de «négawatts», notamment dans les services généraux d'immeubles, soit les prestations destinées à l'ensemble des occupants d'un bâtiment.

Cet article présente une méthodologie de calcul d'indices de consommation électrique spécifique destinés à évaluer l'efficacité des prestations de l'électricité pour les services généraux d'immeuble par type de prestation (éclairage des locaux communs, appareils de buanderie, ascenseurs, ventilation mécanique, etc.). Nous en dérivons un diagnostic de performance électrique permettant d'évaluer le potentiel d'économies d'électricité pour un bâtiment donné. L'évaluation est fondée sur la comparaison entre les indices de l'immeuble et des valeurs cibles issues de la distribution de ces indices dans la population de référence.

La méthodologie est illustrée par les résultats d'une étude réalisée sur un échantillon d'immeubles de logement de Genève.

SUMMARY

In Switzerland, electricity conservation has been given one of the top priorities in the programme «Energy 2000», in order to avoid any development of a national nuclear power capacity. This conservation effort is concentrated on constructed areas as they seem to offer many electricity saving opportunities, especially in the building's common services, namely the services addressed to all the residents of a building.

This paper presents a methodology to compute specific electricity consumption indexes enabling to assess the efficiency of common electricity services in a building for fairly homogeneous groups of services (lighting of common space, laundry equipment, lifts, electric fans, etc.). We derive a diagnosis of electricity performance allowing to assess the electricity conservation potential for a given building. The assessment is based on the comparison between the values of these indexes computed for the building and some target values stemming from the reference population distribution of such indexes.

The methodology is illustrated by means of the results of a project carried out on a sample of residential buildings in Geneva.

ZUSAMMENFASSUNG

In der Schweiz hat das Aktionsprogramm «Energie 2000» Stromsparmassnahmen zu einer Priorität erklärt, mit dem Ziel, eine Zunahme des Kernkraftwerkbestands zu verhindern. Diese Anstrengung konzentriert sich auf den Gebäudesektor, der über zahlreiche Negawattvorkommen zu verfügen scheint, insbesondere bei den allgemeinen Hausdiensten, d.h. bei den Dienstleistungen, die für alle Gebäudeinsassen bestimmt sind.

Dieser Artikel stellt eine Methodologie vor zur Berechnung von Indexen des spezifischen Stromverbrauchs für die allgemeinen Dienstleistungen eines Gebäudes (Beleuchtung der Gemeinschaftsräume, Waschküchengeräte, Lifte, mechanische Lüftung usw.). Wir leiten davon eine Diagnose der elektrischen Leistungsfähigkeit ab, die das Stromsparerpotential eines bestimmten Gebäudes abzuschätzen erlaubt. Die Evaluation beruht auf dem Vergleich der Indexe des Gebäudes und den Zielwerten, die sich aus der Verteilung der Indexe in der entsprechenden Population ergeben.

Die Methodologie ist veranschaulicht anhand der Resultate einer Studie, die bei einer Stichprobe von Wohngebäuden in Genf durchgeführt wurde.

