

NUMMER 12, 18 JANUARI 2024

**GENTSE
ECONOMISCHE
INZICHTEN**



**UNIVERSITEIT
GENT**

COMMENT RENDRE LA DEMANDE D'ÉLECTRICITÉ PLUS RÉACTIVE À LA PRODUCTION VARIABLE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

Un résumé de 150 estimations empiriques de la flexibilité de la demande

Marten Ovaere, Brent Bleys, Mariateresa Silvi,
Sam Hamels et Baptiste Rigaux,
Département d'Économie, Universiteit Gent

 **FACULTEIT ECONOMIE
EN BEDRIJFSKUNDE**

RÉSULTATS PRINCIPAUX

- Nous avons réalisé une méta-analyse de 150 estimations empiriques de la flexibilité de la demande d'électricité provenant de 44 études académiques.
- Nous avons identifié l'effet des incitations par l'information, des incitations financières et des technologies d'automatisation.
- Isolément, les incitations par l'information, les incitations financières ou les technologies d'automatisation ne diminuent pas significativement la demande d'électricité aux heures de pointe de consommation.
- Mais lorsque ces approches sont combinées entre elles, la réponse de la demande d'électricité est bien plus importante. Tout comme combiner différents ingrédients permet de préparer un meilleur plat.
- Les incitations par l'information aident les individus à reconnaître les avantages financiers de leurs actions, tandis que les technologies d'automatisation rendent ces actions faciles à réaliser.
- Tous les types d'incitations financières à réduire la consommation d'électricité fonctionnent à peu près aussi bien. En Flandre, les ménages peuvent consulter le site de la VREG (*le régulateur du marché du gaz et de l'électricité en Flandre*) pour facilement estimer leurs économies potentielles en passant à un contrat à tarification dynamique : <https://vtest.vreg.be/>.
- Montrer aux individus comment leur comportement se compare à celui des autres (la « comparaison sociale ») s'avère plus efficace pour rendre la demande d'électricité plus flexible que le fait de les informer sur les aspects moraux de leurs actions, comme par exemple l'impact de ces comportements sur la société au sens large (l'« appel aux valeurs morales »).
- Afin de rendre la demande d'électricité plus flexible, il est nécessaire de combiner les incitations par l'information, les incitations financières et les technologies d'automatisation. En Flandre, où les contrats d'électricité à tarification dynamique sont déjà disponibles, cela peut être réalisé par exemple en souscrivant un tel contrat, en suivant sa consommation sur mijn.fluvius.be (*Fluvius est le gestionnaire de réseau de distribution de gaz et d'électricité en Flandre*) et en optimisant les usages énergivores (tels que la recharge d'un véhicule électrique et le chauffage avec une pompe à chaleur) à l'aide d'applications et de technologies comme les thermostats et prises intelligentes.

INTRODUCTION

Ce document est issu de la série de publications “Gentse Economische Inzichten” et résume les résultats de 44 études académiques analysant les principaux facteurs visant à mieux ajuster la demande d'électricité à la production variable d'énergie renouvelable.

UNE DEMANDE RÉACTIVE FAVORISE L'INTÉGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET PERMET DE RÉALISER DES ÉCONOMIES

La transition vers l'énergie durable nécessite une augmentation significative de la production d'électricité à partir de sources renouvelables comme le vent et le soleil. Ces sources produisent de l'électricité sans émettre de carbone, mais leur production dépend des conditions météorologiques.

Étant donné que l'offre et la demande d'électricité doivent être synchronisées à tout instant, la **variabilité de la production d'énergie renouvelable signifie que la demande d'électricité doit également devenir plus flexible**. Les jours où il y a peu de vent et de soleil, il est important de réduire la consommation d'électricité autant que possible afin de minimiser le recours aux combustibles fossiles pour produire de l'électricité. À l'inverse, il n'est pas nécessaire d'économiser l'électricité lors des jours très ensoleillés et venteux et nous pouvons alors librement consommer l'électricité disponible.

Cependant, rendre flexible la demande d'électricité des ménages est encore un défi, en particulier aux heures de pointe de consommation, qui surviennent généralement le matin et le soir. Lors de ces périodes, la demande d'électricité des ménages augmente rapidement en raison de besoins spécifiques - et actuellement non flexibles - tels que le chauffage. Ces fluctuations rapides de la demande sont difficiles à prendre en charge par la production renouvelable variable et nécessitent souvent des centrales au gaz. Ces centrales sont capables de fournir l'électricité supplémentaire nécessaire pendant les heures de pointe, mais cela s'accompagne d'émissions de gaz à effet de serre.

La flexibilité de la demande n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, elle est également

économiquement avantageuse. Étant donné que le solaire et l'éolien produisent de l'électricité à un coût marginal nul, les prix de l'électricité sont beaucoup plus bas lorsque la production solaire et éolienne est élevée. Comme le montre la **Figure 1**, les prix de l'électricité varient considérablement au fil du temps. En 2023, les prix moyens de l'électricité en Belgique (représentés par la ligne noire) étaient de 50 à 70 €/MWh plus bas pendant la nuit et en début d'après-midi que pendant les pointes du matin et du soir. Pour un ménage moyen consommant 3,5 MWh par an, le fait de déplacer la consommation d'électricité en dehors des heures de pointe peut permettre d'économiser environ 200€ par an. Le graphique révèle également d'importantes variations d'un jour à l'autre (zone grise), avec des différences de prix entre les pointes et les heures creuses pouvant atteindre jusqu'à 200€ par certains jours. Il a été également observé qu'il y a eu 222 heures en 2023 durant lesquelles les prix de l'électricité étaient négatifs, ce qui signifie que les **consommateurs étaient payés pour consommer de l'électricité durant ces périodes**.

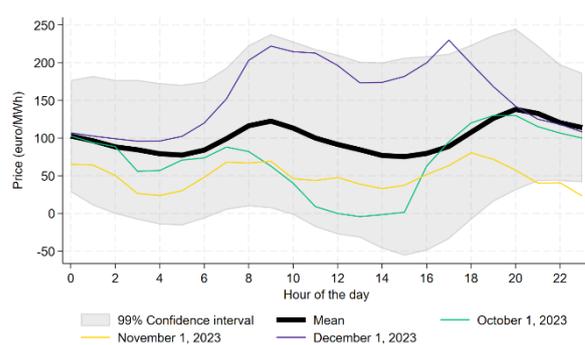


Figure 1. Le prix moyen de l'électricité en Belgique en 2023 varie au cours de la journée (ligne noire). L'intervalle de confiance à 95 % (zone grise) indique que les prix sont parfois négatifs, notamment pendant la nuit et en début d'après-midi.

Aujourd'hui, de nombreux grands consommateurs industriels d'énergie adaptent leurs processus pour gagner de l'argent en déplaçant leur demande vers les heures où les énergies renouvelables sont abondantes et les prix sont bas. Au niveau des ménages, ce processus visant à rendre la demande d'électricité plus réactive à la production renouvelable en est encore à ses balbutiements, mais le **nombre croissant de véhicules électriques et de pompes à chaleur offre des opportunités**. Les activités comme le chauffage du logement ou la recharge d'un véhicule électrique sont beaucoup moins dépendantes du temps et peuvent facilement être déplacées de quelques heures (pour le chauffage) à quelques jours

(pour la recharge), sans impact significatif sur le confort. Cela réduit non seulement les coûts de fonctionnement d'une pompe à chaleur ou d'un véhicule électrique, mais favorise également l'intégration de grandes quantités d'énergie solaire et éolienne.¹

Chauffer intelligemment et recharger intelligemment est aussi bon pour le portefeuille que pour le climat

UN DOMAINE DE RECHERCHE EN PLEIN ESSOR

Dans le domaine de l'économie de l'énergie, la recherche sur l'efficacité de différentes méthodes pour rendre la consommation d'électricité domestique plus flexible s'est considérablement développée.

Aujourd'hui, les scientifiques du monde entier expérimentent diverses stratégies et approches pour passer d'un **système électrique rigide, axé sur l'offre et dans lequel la demande est passive et inflexible à un système dans lequel la demande d'électricité des ménages répond activement à la production d'énergie renouvelable.**

UNE MÉTA-ANALYSE DE LA LITTÉRATURE ACADÉMIQUE

La littérature de recherche distingue trois types d'approches qui peuvent aider les ménages à utiliser l'électricité de manière plus flexible :

1. **Les incitations financières** permettent aux ménages d'économiser de l'argent ou d'être rémunérés en utilisant l'électricité à certains moments. Par exemple, les ménages peuvent payer moins cher l'électricité lorsqu'ils la consomment en dehors des heures de pointe ou pendant les périodes où la production d'énergie renouvelable est élevée.

¹ Une étude récente d'Elia montre que d'ici à 2034, en rendant 80 % des pompes à chaleur et des véhicules électriques très flexibles, le besoin de la Belgique en capacité de production de réserve (qui emploie généralement des combustibles fossiles) peut être réduit de 2700 MW par rapport à un scénario dans lequel les pompes à chaleur et les véhicules électriques ne sont pas du tout flexibles (Source : Elia, Adequacy & Flexibility Study

2. **Les incitations par l'information** permettent aux ménages d'ajuster leur consommation d'électricité grâce à des informations pratiques sur les contrats, leur consommation d'électricité ou grâce à des messages normatifs. Par exemple, il peut s'agir d'un SMS envoyé aux ménages pour leur rappeler le coût de l'électricité aux heures de pointe, pour les informer sur l'importance d'économiser l'énergie pour la société et le climat, ou pour leur donner des conseils pratiques sur la façon d'économiser l'énergie.
3. **L'automatisation intelligente** aide les ménages à économiser de l'argent et de l'énergie sans même avoir à y penser, grâce à l'utilisation d'appareils intelligents. Par exemple, un thermostat qui ajuste automatiquement la température en fonction des prix de l'électricité ou une application de recharge intelligente pour programmer la recharge d'un véhicule électrique pendant les heures les moins chères.

De la sorte, les ménages disposant d'un thermostat qui ajuste automatiquement le chauffage (automatisation intelligente) lorsque les prix de l'électricité augmentent ou diminuent (incitation financière) économiseront de l'argent. De même, s'il leur est envoyé un message les informant que les prix sont très élevés, on peut considérer cela comme un coup de pouce (un « *nudge* ») les incitant à économiser de l'argent à ce moment-là (incitation par l'information).

Un aspect essentiel est de comparer l'efficacité de ces trois approches. Pour ce faire, nous nous sommes plongés dans la littérature scientifique en économie de l'énergie et nous nous sommes concentrés en particulier sur les articles publiés après 2007 qui présentent les résultats d'expériences visant à réduire la consommation d'électricité des ménages pendant des périodes spécifiques - généralement pendant les heures de pointe - en utilisant une ou plusieurs des trois approches mentionnées ci-dessus. Nous avons extrait 150 estimations de l'« effet moyen de traitement » (ou « *average treatment effect* » en anglais, abrégé ATE) de cette littérature. Ces

for Belgium 2024-2034, p. 220). À titre de référence, une nouvelle centrale au gaz (CCGT) de grande échelle a une capacité de production d'environ 800 MW. En gros, cela signifie qu'exploiter la flexibilité des véhicules électriques et des pompes à chaleur peut éviter la construction de trois nouvelles grandes centrales électriques au gaz en Belgique d'ici 2034.

valeurs représentent le pourcentage de réduction de la consommation d'électricité pendant les heures spécifiques visées par le traitement (les « périodes cibles »). Par la suite, nous nous référons à ces effets de traitement en tant que « les effets ».

Cinq résultats clés

1 LA RÉPONSE DE LA DEMANDE EST MAXIMALE LORSQUE LES INCITATIONS PAR L'INFORMATION, LES PRIX DYNAMIQUES ET LES TECHNOLOGIES D'AUTOMATISATION SONT COMBINÉS

La **Figure 2** présente un résumé des 150 effets moyens pour toutes les combinaisons des incitations financières, des incitations par l'information et des technologies d'automatisation. Pour chaque type d'approche - et chaque combinaison de celles-ci - la figure présente un point (en noir) indiquant la diminution médiane de la consommation d'électricité pendant la période cible. Les lignes noires et grises autour du point indiquent le niveau de variation autour de la médiane (du 5^{ème} au 95^{ème} percentile).

La figure montre que lorsque nous utilisons uniquement les incitations par l'information ou les incitations financières, la réduction de la demande d'électricité est faible, avec une diminution médiane de 4 % pour chacun de ces deux types d'incitations (voir les résultats des deux rangées du bas). Cela signifie que simplement rappeler aux individus d'économiser l'électricité pendant les heures de pointe ou la simple existence de prix qui dépendent du temps ne réduit pas la demande d'électricité de manière significative.

Cependant, lorsque nous combinons deux approches, nous observons une réduction plus substantielle de la demande d'électricité pendant les périodes cibles, surtout lorsque nous associons les incitations financières aux technologies d'automatisation. Mais la réduction la plus substantielle se produit lorsque nous utilisons les trois stratégies ensemble : les incitations par l'information, les incitations financières et les technologies

d'automatisation, permettant alors une diminution médiane de la consommation d'électricité de 19 %. Ces trois stratégies se renforcent mutuellement car certains types d'incitations par l'information peuvent aider les individus à comprendre les avantages financiers de leurs actions, tandis que les technologies d'automatisation leur permettent de déplacer leur demande d'électricité sans effort.

Pour rendre la demande d'électricité plus flexible, il est donc important de mettre en œuvre les trois stratégies. Dans le contexte belge, cela signifie par exemple souscrire un contrat dynamique, avoir accès à des informations claires sur sa propre consommation d'électricité², et utiliser des applications et des appareils intelligents tels que des thermostats et des prises connectées pour automatiser des tâches comme la recharge de véhicules électriques et le contrôle du chauffage.

L'information encourage les individus à identifier les avantages financiers de leurs actions, tandis que les technologies d'automatisation permettent de réaliser ces actions sans effort.

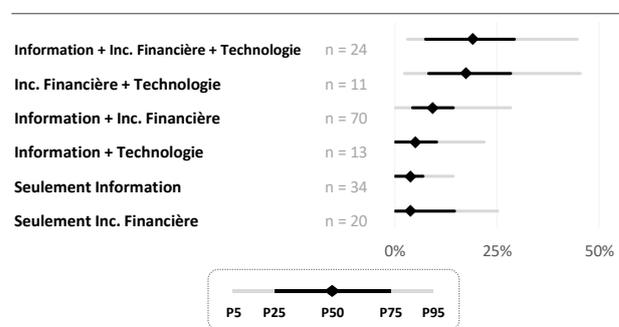


Figure 2. Réduction de la consommation d'électricité pendant les périodes cibles, par (la combinaison) des incitations financières, des incitations par l'information et des technologies d'automatisation.

Enfin, il est important de noter que parmi les incitations purement financières – sans incitation par l'information ou technologies d'automatisation – l'effet médian est assez faible, mais certaines études ont rapporté des effets très importants, comme l'indiquent les valeurs élevées des 75^{ème} et 95^{ème} percentiles. Cette variation s'explique par le fait que la **Figure 2** résume un large éventail

² Par exemple en Flandre sur <https://mijn.fluvius.be>.

d'articles scientifiques. Certains de ces articles ont étudié l'effet d'incitations financières relativement faibles, où il n'y avait seulement qu'une petite différence entre les prix pendant les heures de pointe et ceux des heures creuses. D'autres ont étudié des environnements où les incitations financières étaient très fortes, avec des prix en période de pointe considérablement plus élevés qu'en période creuse, entraînant de plus grandes réductions de la consommation d'électricité. De plus, dans certaines situations, les participants n'étaient même pas conscients de l'incitation financière en place, ce qui peut expliquer les effets plus faibles observés. Les figures présentées par la suite approfondissent ces aspects.

2 TOUS LES TYPES D'INCITATIONS FINANCIÈRES À ÉCONOMISER L'ÉLECTRICITÉ À DES MOMENTS SPÉCIFIQUES FONCTIONNENT À PEU PRÈS DE LA MÊME MANIÈRE

L'une des manières d'inciter les ménages à utiliser l'électricité lorsqu'elle est la moins chère et la plus verte est de mettre en place des prix qui varient au cours du temps. Ceux-ci reflètent au mieux le mix énergétique et la pénurie sur le marché de l'électricité. Il existe différentes incitations financières de ce type, chacune exposant les ménages à des prix qui fluctuent d'une manière différente. Nous catégorisons les incitations financières les plus couramment rencontrées dans la recherche scientifique expérimentale comme suit:

- **Les incitations financières de type CPR/ CPP/ VPP** (de l'anglais « *Critical Peak Rebate* », « *Critical Peak Pricing* » et « *Variable Peak Pricing* ») augmentent les prix spécifiquement lors de rares périodes de « pointe de charge » dans le système électrique. Par exemple, lors des journées avec très peu de soleil ou de vent et/ou une demande d'électricité exceptionnellement élevée, le fournisseur d'énergie ou le gestionnaire de réseau peut déclarer un « pic critique ». En de tels cas, les ménages sont exposés à des prix

beaucoup plus élevés (dans le cas des incitations CPP/VPP) pendant les périodes de pointe des jours déclarés « critiques » ou bien reçoivent des remises s'ils consomment moins d'électricité que d'habitude pendant ces périodes de pointe (dans le cas des incitations CPR).

- **L'incitation financière de type RTP** (de l'anglais « *Real-Time Pricing* ») suit de près les fluctuations horaires des prix de l'électricité qui se produisent chaque jour sur les marchés de l'électricité. Les clients de ce type de contrat sont exposés à des prix qui varient toutes les heures ou tous les quarts d'heure, au cours d'une journée ainsi que d'un jour à l'autre.
- **L'incitation financière de type TOU** (de l'anglais « *Time Of Use* ») fixe des prix différents à différents moments de la journée. La tarification TOU est généralement plus simple que la tarification en temps réel RTP, en ce sens que la grille tarifaire TOU reste constante d'un jour à l'autre au cours d'une saison ou d'une année.

En Belgique, alors que l'incitation financière TOU est déjà mise en place avec certains contrats (par exemple les contrats bihoraires avec un tarif jour/nuit), la tarification en temps réel RTP n'est seulement disponible qu'en Flandre avec les « contrats dynamiques » et les tarifications critiques CPR/ CPP/ VPP ne sont pas encore développées. En pratique, le site web de la VREG³ offre un **outil facile d'utilisation pour aider les ménages flamands à estimer les économies réalisées en optant pour un contrat dynamique.**

La **Figure 3** compare l'effet de chacune de ces incitations financières. Plus précisément, elle présente la réduction médiane de la consommation d'électricité pendant les périodes cibles et moyennée sur tous les effets de traitement estimés dans les cas où le traitement comprend, entre autres, une incitation financière.⁴

Comme le montre la **Figure 3**, il n'y a pas d'indication claire qu'un type d'incitation financière soit beaucoup plus efficace qu'un autre. Les trois types d'incitations

des retours d'information en temps réel (pour informer les ménages de leur consommation pendant les périodes de pointe). Dans de nombreuses expériences, elles sont également combinées avec la technologie, ce qui (comme le montre la **Figure 2**) conduit à d'importantes réductions de la consommation d'électricité.

³ L'outil est accessible sur <https://vtest.vreg.be/> - "Ik wil mijn verbruiksgegevens opladen".

⁴ Dans les 150 effets de traitement moyens que nous avons identifiés, les incitations financières sont le plus souvent combinées avec des incitations par l'information telles que des alertes (par exemple pour annoncer les jours de pic critique) et

financières entraînent une réduction médiane de la consommation comprise entre 8 et 12 %. Bien que les résultats ne permettent pas de déterminer quel type d'incitation financière entraîne les plus grands changements dans la consommation d'électricité des ménages, la **Figure 3**, combinée à la **Figure 2**, montre que **la présence d'un type spécifique d'incitation financière n'est pas importante en soi**. En revanche, les résultats de la recherche sur le sujet semblent **suggérer que c'est la combinaison d'incitations financières avec d'autres stratégies qui importe réellement**. En particulier, les ménages soumis à l'un de ces systèmes tarifaires doivent en être informés (ce que les incitations par l'information permettent) et doivent pouvoir y réagir facilement (via la technologie et l'automatisation, voir le résultat clé 5).

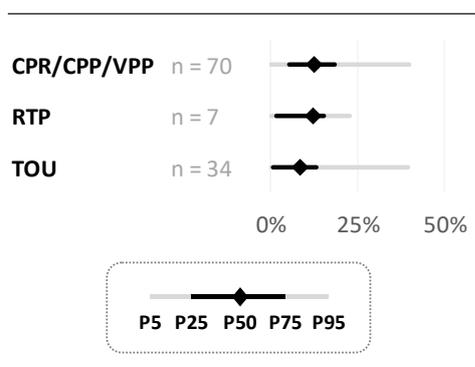


Figure 3. Réduction de la consommation d'électricité pendant les périodes cibles, par type d'incitation financière.⁵

3 LES COMPARAISONS SOCIALES SONT PLUS EFFICACES QUE LES APPELS AUX VALEURS MORALES

Une autre méthode pour inciter à une utilisation plus flexible de l'électricité consiste à inciter par l'information. Plutôt que d'offrir des incitations financières, cette approche fait appel à la motivation intrinsèque des individus - en lançant des appels aux valeurs morales ou en comparant le comportement des individus entre eux. Ce type d'incitations peut également présenter des informations pratiques aux ménages, leur permettant par la suite d'ajuster activement leur consommation d'électricité - via, par exemple, des messages personnalisés sur leur consommation d'électricité, des alertes sur les périodes de pointe, des conseils sur la manière de réduire la

consommation d'électricité et des estimations des économies potentielles sur leur facture. Bien que souvent ces informations pratiques sont combinées avec des incitations financières, les appels aux valeurs morales et les comparaisons sociales ont également été fréquemment testés dans la recherche scientifique, en tant qu'approches purement basées sur les normes. Cela nous permet d'examiner les preuves empiriques de l'effet des motivations intrinsèques à économiser l'énergie pendant les heures de pointe, même en l'absence de récompenses financières. Plus spécifiquement :

- **Les appels aux valeurs morales** consistent en des demandes généralement émises par les autorités publiques et adressées au grand public. Ils incitent à réduire la consommation d'électricité en période de crise énergétique. Les gouvernements ont recours aux appels aux valeurs morales depuis des décennies, pour réduire la demande résidentielle d'énergie et d'eau, par exemple lors de pénuries prolongées, comme lors des sécheresses ou durant la crise énergétique résultant de l'invasion russe en Ukraine. Dans des travaux de recherche plus récents, les appels aux valeurs morales ont également été testés en collaboration avec des entreprises du secteur de l'énergie. S'il était anticipé que le système ferait face à une forte consommation le lendemain, ces entreprises envoyaient alors des messages privés aux ménages (par e-mail, téléphone ou SMS), les invitant à économiser l'électricité, ceci dans l'intérêt de la société et du climat et durant des périodes plus courtes (quelques heures, par exemple).
- **Les comparaisons sociales** sont la catégorie d'incitations par l'information la plus fréquemment testée dans la recherche. Dans ce type de programme, les ménages reçoivent des informations sur leur consommation moyenne d'électricité pendant les heures de pointe et celle-ci est comparée à la consommation de leurs voisins ou d'autres ménages similaires. En général, les ménages reçoivent également une liste de conseils pratiques pour réduire leur consommation d'électricité. Les ménages qui consomment moins que leurs semblables reçoivent alors une récompense symbolique, sous forme d'un smiley ou d'un pouce levé afin de les encourager à prolonger leurs efforts. Ce type de message est

⁵ Les losanges correspondent aux valeurs médianes ; les lignes noires couvrent 50 % des observations au centre ; les lignes

grises couvrent 90 % de toutes les observations, à l'exception des 10 % des valeurs les plus extrêmes.

efficace car il influence les croyances et attentes qu'ont les individus quant à ce que leurs pairs jugeraient approprié ou quant à la manière avec laquelle leurs pairs réagiraient dans certaines situations. Ainsi, le désir de tout un chacun de se conformer et de se sentir socialement accepté est ce qui induit en fin de compte de tels changements dans leur comportement de consommation. Bien que les comparaisons sociales aient également été testées pour générer des économies d'énergie en général (c'est-à-dire quel que soit le moment), des expériences plus récentes ont utilisé cette approche pour essayer de réduire la consommation d'électricité pendant les pointes de consommation en particulier.

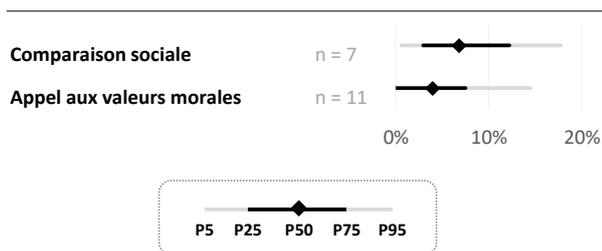


Figure 4. Réduction de la consommation d'électricité obtenue pendant les périodes cibles, obtenue par comparaisons sociales et appels aux valeurs morales.⁶

Notre recherche indique les **deux types d'incitations par l'information fonctionnent et que les comparaisons sociales sont légèrement plus efficaces que les appels aux valeurs morales**. Comme le montre la Figure 4, ces types d'incitations entraînent une réduction médiane de 7 % et 4 % respectivement. Cependant, ces résultats suggèrent que **la réduction totale de la consommation d'électricité qui peut être obtenue en renforçant uniquement la motivation intrinsèque des individus reste relativement faible. Cette méthode n'est en soi pas suffisamment efficace pour contribuer significativement à aligner la demande d'électricité à la production variable d'énergie renouvelable.**

⁶ Les losanges correspondent aux valeurs médianes ; les lignes noires couvrent 50 % des observations au centre ; les lignes grises couvrent 90 % de toutes les observations, à l'exception des 10 % des valeurs les plus extrêmes.

⁷ Sur la base de notre recherche, nous émettons l'hypothèse que l'impact accru de ces incitations lorsqu'elles sont combinées est dû à deux raisons. D'une part, les incitations par l'information fournissent aux ménages des informations essentielles et bienvenues sur les incitations financières en place, ce qui leur permet d'ajuster leur consommation en conséquence.

4 L'INFORMATION REND LES INCITATIONS FINANCIÈRES PLUS EFFICACES

Bien que renforcer la motivation intrinsèque des individus pour les inciter à économiser l'énergie pendant une pénurie ne soit pas toujours suffisant en soi, on peut combiner les incitations par l'information avec les incitations financières. **Notre recherche montre que les incitations par l'information peuvent considérablement renforcer l'efficacité des incitations financières.**⁷ Comme le montre la Figure 5, la réduction médiane de la consommation d'électricité **augmente de 5 à 9 points de pourcentage** lorsque les incitations financières sont associées à des incitations par l'information, par rapport à l'effet des incitations financières utilisées seules. Les incitations par l'information les plus couramment combinées avec les incitations financières incluent des conseils pour économiser, des alertes sur les périodes de pointe et des informations en temps réel sur sa propre consommation d'électricité. Ces informations en temps réel sont souvent présentées via des écrans de contrôle dans le logement ou via des portails en ligne tels que <https://mijn.fluvious.be>.

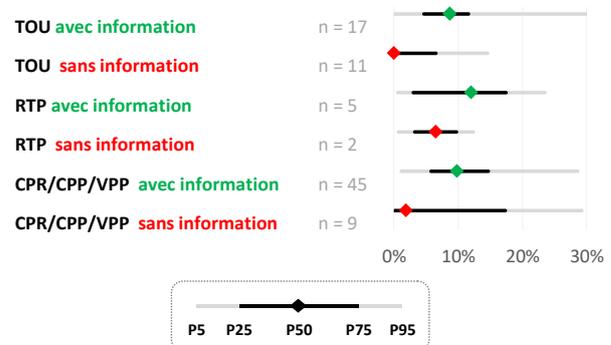


Figure 5. Réduction de la consommation d'électricité pendant les périodes cibles, obtenue par des incitations financières et en combinaison (vert) ou non (rouge) avec des incitations par l'information.⁸

D'autre part, ces types d'incitations s'adressent à des groupes distincts. Plus précisément, la littérature montre que les ménages qui consomment beaucoup d'énergie sont davantage influencés par les comparaisons sociales, tandis que ceux qui consomment moins sont plus sensibles aux incitations financières.

⁸ Les losanges correspondent aux valeurs médianes ; les lignes noires couvrent 50 % des observations au centre ; les lignes grises couvrent 90 % de toutes les observations, à l'exception des 10 % des valeurs les plus extrêmes. Tous les effets de traitement qui ont un traitement technologique sont exclus.

5 LES TECHNOLOGIES DE L'AUTOMATISATION RENFORCENT GRANDEMENT LA FLEXIBILITÉ DE LA DEMANDE D'ÉLECTRICITÉ

La dernière pièce du puzzle pour rendre flexible la demande d'électricité des ménages est de s'assurer que réagir aux prix de l'électricité et à la production éolienne et solaire ne nécessite que peu, voire pas d'effort. **La technologie peut permettre cela en aidant les ménages à ajuster leur consommation d'électricité heure par heure en réponse à des incitations financières et/ou à des incitations par l'information.** Par exemple, les technologies d'automatisation domestique peuvent décaler la consommation électrique de certains appareils ménagers comme les pompes à chaleur ou les véhicules électriques, vers les heures où cette consommation est à la fois la plus respectueuse du climat et la plus avantageuse financièrement.

Dans notre revue de la littérature, nous avons identifié deux rôles principaux par lesquels la technologie peut contribuer à une demande flexible.

Premièrement, pour tirer le meilleur parti de la production d'électricité renouvelable, il est important que nous électrifiions la consommation résidentielle autant possible. Cela signifie, par exemple, remplacer les voitures à carburant fossile par des véhicules électriques ou le chauffage au gaz par des pompes à chaleur. Bien entendu, ces appareils consomment beaucoup d'électricité et peuvent donc accroître la pression sur le réseau électrique. **Mais cela signifie aussi qu'ils offrent un grand potentiel de flexibilité.** Il est en effet possible d'optimiser le moment où un véhicule électrique commence à recharger (ou même, se décharge sur le réseau moyennant une compensation). Aussi, le moment où une pompe à chaleur chauffe de l'eau à destination du chauffage du logement ou de l'eau chaude sanitaire peut également être optimisé intelligemment sans impact significatif sur le confort. **C'est pourquoi nous appelons ces types d'appareils des « grandes consommations déplaçables ».** De plus, les appareils électroménagers qui sont déjà largement répandus, tels que les fours électriques ou les machines à laver, entrent également dans cette catégorie : ils consomment beaucoup d'électricité et il est donc bénéfique à la fois pour le climat et notre

portefeuille de déplacer leur utilisation en dehors des heures de pointe (en présence d'incitations financières).

Deuxièmement, en pratique, des « technologies facilitatrices » sont nécessaires pour exploiter efficacement le potentiel de flexibilité des grandes consommations déplaçables. **Par technologie facilitatrice, nous entendons des applications ou appareils qui diminuent voire éliminent complètement l'effort requis pour déplacer la consommation d'électricité en dehors des périodes de pointe.** Il peut s'agir, par exemple, de thermostats programmables, qui aident les ménages à établir des horaires pour le chauffage (de sorte que l'eau chaude sanitaire soit produite à la mi-journée, lorsque la production solaire est généralement à son maximum), ou de stations de recharge intelligentes pour les véhicules électriques. Même de simples prises de courant contrôlables (avec ou sans l'aide d'une application) peuvent être utiles, en permettant à l'appareil branché de s'allumer ou de s'éteindre automatiquement à certaines heures de la journée, pour rendre la consommation domestique plus flexible.

La **Figure 6** présente la réduction médiane de la consommation d'électricité, dans les études où les ménages participants avaient (ou non) accès à des technologies facilitatrices ou disposaient de grandes consommations déplaçables. Comme le montre la valeur médiane de 9 %, **le simple fait de disposer de grandes consommations déplaçables conduit déjà à une importante réduction de la consommation d'électricité pendant les heures de pointe.** Plus remarquable encore, les ménages disposant de technologies facilitatrices réduisent encore plus leur consommation lors des pointes, comme en témoigne l'effet médian de 17 % et le 75^{ème} percentile qui approche les 30 %.

Bien que ce soit là une indication que les technologies facilitatrices peuvent aider à déplacer la consommation en pratique, et donc soutenir un système électrique basé en grande partie sur les énergies renouvelables, **il y a là encore beaucoup de potentiel à exploiter.**

En effet, parmi les 27 effets moyens qui impliquent l'utilisation de technologies facilitatrices, la grande majorité des ménages participants disposait uniquement de thermostats programmables. Bien que ces thermostats aident effectivement les ménages à ajuster leur chauffage, ils ne sont certainement pas « intelligents », comme c'est d'ailleurs le cas de la plupart des technologies

facilitatrices actuellement disponibles sur le marché. À l'avenir, les **technologies facilitatrices intelligentes seront plus répandues et permettront aux grandes consommations déplaçables de répondre de manière optimale à la production éolienne et solaire. En permettant aux appareils de réagir automatiquement aux signaux envoyés par le fournisseur d'énergie ou le gestionnaire de réseau, il sera également possible de réduire la factures des ménages, en respectant leur confort.** Par exemple, les chargeurs intelligents pour **véhicules électriques** peuvent optimiser le moment de la recharge tout en s'assurant que les préférences des ménages en matière d'autonomie minimale et d'autres besoins de confort (spécifiés par l'utilisateur au moyen d'une application par exemple) soient respectés en permanence.

Ainsi, les technologies facilitatrices intelligentes, sûres, simples et accessibles sont la clé pour tirer pleinement parti de la flexibilité des grandes consommations déplaçables. Répondre plus efficacement à la production renouvelable et réduire la facture d'électricité – en réagissant aux incitations financières – peut être grandement simplifié pour les ménages, tout en préservant parfaitement les préférences individuelles en termes de confort.

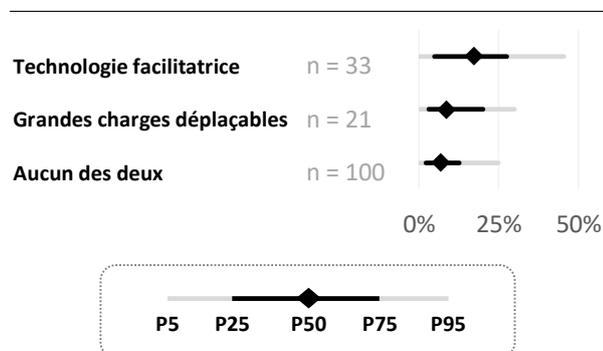


Figure 6. Réduction de la consommation d'électricité en présence de technologies facilitatrices et de grandes charges déplaçables.⁹

⁹ Les losanges correspondent aux valeurs médianes ; les lignes noires incluent 50 % des observations au milieu ; les lignes

« Les technologies facilitatrices intelligentes, sûres, simples et accessibles sont la clé pour tirer pleinement parti de la flexibilité des grandes charges déplaçables comme les pompes à chaleur et les véhicules électriques. »

CONCLUSION

Notre recherche sur la manière d'améliorer la réactivité de la demande d'électricité résidentielle à la production d'énergie solaire et éolienne aboutit à plusieurs conclusions importantes.

Notre analyse indique que les incitations par l'information et les incitations financières ne sont probablement pas suffisamment efficaces lorsqu'elles sont employées séparément. Pour atteindre le niveau nécessaire de flexibilité de la demande pour soutenir un réseau électrique largement alimenté par l'énergie éolienne et solaire, il faut aller encore plus loin.

Les résultats sont plus prometteurs lorsque les incitations par l'information et les incitations financières sont combinées, notamment parce que les messages informatifs peuvent aider à sensibiliser les ménages et les rendre plus attentifs aux incitations financières en place qui peuvent bénéficier leur portefeuille. De plus, l'efficacité des incitations est considérablement améliorée lorsque des technologies qui facilitent et automatisent la réponse sont employées. En outre, le fait de disposer de grandes charges déplaçables comme les pompes à chaleur et les véhicules électriques, contribue à rendre la demande d'électricité résidentielle flexible.

Toutefois, pour que cette vision d'une demande d'électricité suffisamment flexible devienne la réalité, une action concertée est nécessaire de la part des décideurs politiques, des fabricants et de la communauté scientifique. Les décideurs politiques doivent assurer un déploiement rapide des pompes à chaleur et des véhicules électriques, en parallèle avec l'essor de l'énergie éolienne et solaire. Mais il est également tout aussi important de s'assurer que ces pompes à chaleur et véhicules électriques puissent ensuite répondre facilement et

grises incluent 90 % de toutes les observations, à l'exclusion des 10 % les plus extrêmes.

automatiquement à des incitations financières telles que les tarifs dynamiques d'électricité.

Pour accélérer la transition vers une plus grande flexibilité de la demande, les décideurs politiques doivent soutenir les expériences à grande échelle mettant en pratique une flexibilité entièrement automatisée. Par la suite, notre rôle en tant que scientifiques dans ce paysage en évolution est de nous associer aux acteurs du marché à l'avant-garde de cette transition, afin d'accélérer les processus d'apprentissage et de mises à l'échelle. Parallèlement, les décideurs politiques doivent se charger d'éliminer les obstacles qui entravent le développement d'un écosystème d'appareils domestiques flexibles, de pompes à chaleur et de véhicules électriques. Cela implique notamment d'imposer des protocoles de communication transparents et bien documentés et de prévenir la création de « jardins clos » par les fabricants, afin que différentes marques et différents types d'appareils puissent communiquer entre eux et, plus globalement, avec le marché de l'énergie.

En résumé, bien que l'état actuel de la flexibilité de la consommation électrique des ménages soit modeste, le potentiel d'un effet significatif est indéniable. Tirer parti de ce potentiel exigera de collaborer et de mettre en œuvre des efforts proactifs entre plusieurs secteurs, afin de garantir que le système énergétique soit, à l'avenir, non seulement durable, mais également résilient et efficace.

Intermède : la flexibilité de la demande d'électricité résidentielle est-elle déjà réalisable en Belgique ?

Les nombreuses expériences scientifiques que nous avons résumées dans cette étude ont démontré que les incitations financières, les incitations par l'information et les technologies d'automatisation peuvent contribuer à rendre la demande d'électricité des ménages plus flexible. **Mais dans quelle mesure ces aspects sont-ils implémentés en Belgique à l'heure actuelle ?**

Une première étape essentielle pour favoriser un niveau élevé de flexibilité est le déploiement de compteurs électriques communicants (aussi appelés compteurs « digitaux ») dans les logements. Ces compteurs sont en effet essentiels pour mettre en place les nouveaux contrats dynamiques. En Belgique, le déploiement des compteurs communicants varie d'une Région à l'autre, comme le montre la Table 1.

Table 1. Déploiement des compteurs communicants à ce jour dans les trois Régions en Belgique

	Flandre	Wallonie	Bruxelles-Capitale
Nombre de compteurs électriques communicants installés	> 1 800 000	230 000	(Déploiement débuté en octobre 2023)
Objectif	80% d'ici à la fin 2024 (pour tous les clients)	80% d'ici à 2029 (pour des clients prioritaires)	≈ 100% en 2030 (pour tous les clients)

Incitations financières – En vertu de la réglementation européenne, les grands fournisseurs d'électricité sont obligés de proposer des contrats dynamiques. Ces contrats ont des tarifs qui varient chaque heure et nécessitent un compteur communicant (pour pouvoir établir la facture). C'est pourquoi de tels contrats sont actuellement disponibles uniquement en Flandre. **La Table 2 fournit un aperçu des neuf contrats dynamiques actuellement disponibles pour les clients flamands**, ainsi que la manière dont le prix par kWh d'électricité est calculé. Étant donné que le déploiement des compteurs communicants a également commencé en Wallonie et à Bruxelles, on s'attend à ce que les contrats dynamiques soient proposés dans ces Régions dans un avenir proche.

Table 2. Les neuf contrats dynamiques disponibles pour les ménages flamands en janvier 2024 (avec l'aimable autorisation de Paul Van Cotthem). Remarque: SPOT est le prix horaire de l'électricité (en €/MWh) sur le marché SPOT pour la Belgique.

Fournisseur	Nom du contrat	Formule tarif d'achat (€cent/kWh) TVA exclue	Formule tarif d'injection (€cent/kWh) pas de TVA	Abonnement (€/an) TVA exclue
Bolt	Bolt Online	0,11225 * SPOT + 0,999	0,08840 * SPOT - 0,5000	90,45
EBEM	Groen Dyn@mic	0,10800 * SPOT + 1,750	0,08500 * SPOT - 0,5000	70,75
Ecopower	Dynamische burgers-troom	0,10200 * SPOT + 0,400	0,08500 * SPOT - 0,4000	60,00
Eneco	Zon en wind Dynamisch	0,10200 * SPOT + 1,000	0,10000 * SPOT - 1,1880	94,34
Energie.be	Dynamisch tarief particulieren	0,10580 * SPOT + 1,500	0,08000 * SPOT - 0,5000	33,02
Engie	Dynamisch	0,10000 * SPOT + 0,204	0,10000 * SPOT + 0,0000	95,00
Frank Energie	Dynamisch	0,10680 * SPOT + 1,500	0,08505 * SPOT + 0,0000	23,21
Luminus	Dynamisch	0,10440 * SPOT + 0,370	0,08525 * SPOT - 0,9550	70,75
Octa+	Dynamisch	0,10380 * SPOT + 0,393	0,09880 * SPOT - 1,1683	70,75

Incitations par l'information – Pour que les prix dynamiques soient véritablement avantageux pour les ménages, ceux-ci doivent être en mesure d'y réagir efficacement. Cela signifie que l'information sur ces prix doit être facilement accessible. Les fournisseurs offrent donc sur leur site web (ou sur leur application) un aperçu quotidien des prix horaires pour le jour suivant. **Sur base de cet aperçu, les ménages peuvent par exemple optimiser le moment de démarrer un cycle de machine à laver, d'augmenter le chauffage, de recharger leur véhicule électrique,... et ce lorsque les prix sont au plus bas.**

Technologie – La technologie facilite tous ces aspects. Par exemple, des thermostats intelligents sont proposés par des fabricants tels que Nest, Honeywell et Tado. Certains de ces thermostats sont même capables de suivre automatiquement les tarifs dynamiques de l'électricité afin d'optimiser le chauffage, de sorte que les utilisateurs n'aient même pas besoin de définir un programme de chauffage eux-mêmes. De plus, il existe des applications qui peuvent optimiser la recharge des véhicules électriques, en l'adaptant aux périodes où les prix sont bas. Des exemples de telles applications en Belgique sont l'application « ENGIE Drive » ou l'application « Eneco Slimladen » (voir Figure 7). **Ces applications aident les ménages avec des contrats dynamiques à tirer le meilleur parti des prix variables.**

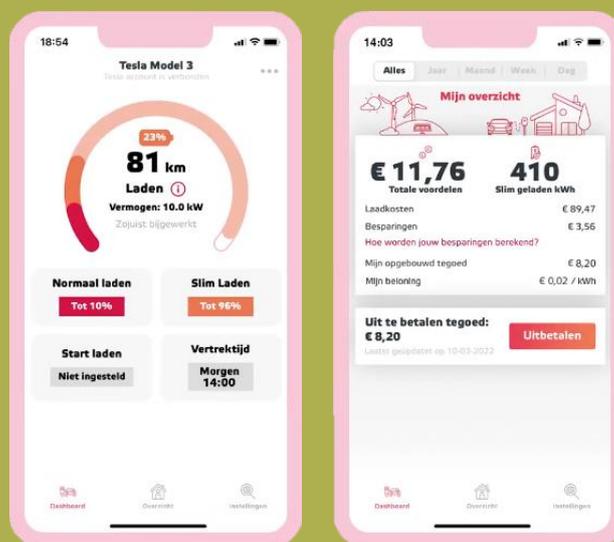


Figure 7. La recharge automatique et intelligente d'un véhicule électrique via l'application « Eneco Slimladen » (avec l'aimable autorisation d'Eneco NV).



Prof. Dr. Marten Ovaere est professeur assistant au Département d'Économie. Ses recherches portent sur l'économie de l'énergie et de l'environnement et plus particulièrement sur les marchés de l'électricité, la politique énergétique et les énergies renouvelables. De plus amples informations sur ses recherches sont disponibles sur sa [page d'accueil](#). Vous pouvez le contacter à l'adresse suivante : Marten.Ovaere@UGent.be



Prof. Dr. Brent Bleys est professeur associé au Département d'Économie. Économiste écologique, il mène des recherches sur les thèmes suivants: au-delà du PIB, la post-croissance, les transition durables et le comportement pro-environnemental. Contact : Brent.Bleys@UGent.be



Dr. Mariateresa Silvi est chercheuse postdoctorale au Département d'Économie. Sa recherche se situe à l'intersection entre l'économie comportementale et l'économie environnementale. Elle étudie ce qui pousse les individus à entreprendre des actions pro-environnementales ainsi que le soutien du public aux politiques d'atténuation du changement climatique. Pour plus d'informations, visitez [son site web](#) ou contactez-la à l'adresse : Mariateresa.Silvi@UGent.be



Dr. Sam Hamels est chercheur postdoctoral en économie de l'énergie au Département d'Économie. Ses recherches se concentrent sur la neutralité climatique du système électrique européen et du parc immobilier, avec un intérêt spécifique sur les simulations des systèmes électriques et la flexibilité de la demande. Vous pouvez le contacter à l'adresse : Sam.Hamels@UGent.be



Baptiste Rigaux est doctorant en économie de l'énergie au Département d'Économie et aspirant en recherche fondamentale du Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek - Vlaanderen (mandat numéro 11Q4224N). Ses recherches utilisent des données empiriques pour étudier le potentiel de flexibilité de la demande d'électricité des ménages en Belgique. Vous pouvez le contacter à l'adresse suivante : Baptiste.Rigaux@ugent.be

Les Gentse Economische Inzichten (GEI) sont un forum où sont accessibles les résultats des recherches et les recommandations politiques des chercheurs de l'Université de Gand. Le contenu de chaque document GEI représente uniquement le point de vue de l'auteur ou des auteurs. Il ne représente pas la vision d'un groupe de recherche, du Département d'Économie ou de l'Université Gent. Pour plus d'informations sur les recherches du Département d'Économie, nous vous renvoyons à <http://www.ugent.be/eb/economics>. Les GEI sont rendus possibles en partie grâce à un don de www.susstinvest.eu. SUSTINVEST n'a pas d'influence sur le contenu et les recommandations politiques.



Cette recherche a également été soutenue par les projets FlexSys et Interflex, financés par le Fonds pour la Transition Énergétique du gouvernement fédéral belge, géré par le SPF Économie, PME, Classes moyennes et Énergie. B. Rigaux a été financé par le Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek – Vlaanderen (FWO) (mandat numéro 11Q4224N).