

Efficacité Energétique et Innovation dans le Bâtiment : une exploration des insuffisances

Soutenance de thèse

Valentin Laprie

Sous la direction de Marc Baudry et Béatrice Dumont

10 janvier 2025



Contexte et motivation

La consommation d'énergie finale dans les bâtiments

- 40% UE, 45% en France
- 13% des émissions de GES en UE, 16% en France

Des objectifs ambitieux en UE : en 2050 100% bâtiments

- basse consommation
- zéro émission

Un rythme de rénovation globale trop faible

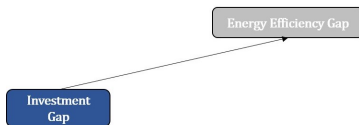
- 3% de bâtiments DPE A en UE, 2% en France
- Taux rénovation globale 0,2%/an en UE, 0,3%/an en France

⇒ 500 ans pour atteindre les objectifs en UE et 400 ans en France

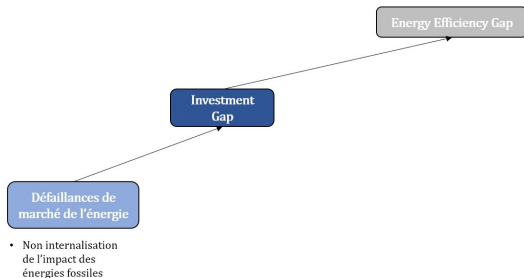
Un Gap entre les prévisions et la réalité

Energy Efficiency Gap

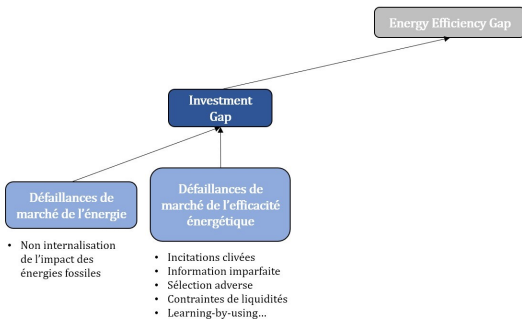
Un Gap entre les prévisions et la réalité



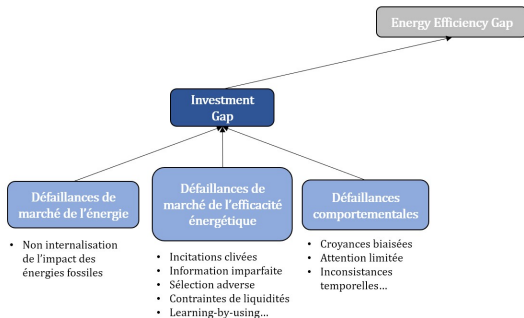
Un Gap entre les prévisions et la réalité



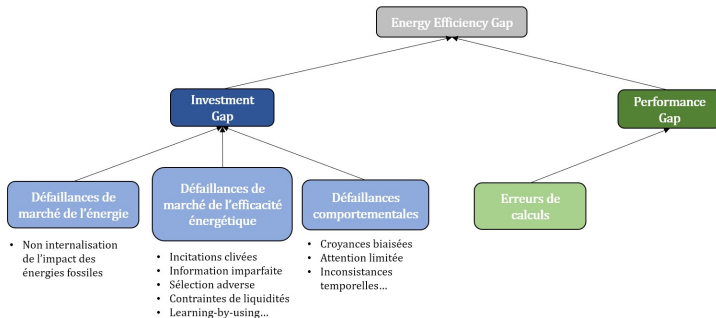
Un Gap entre les prévisions et la réalité



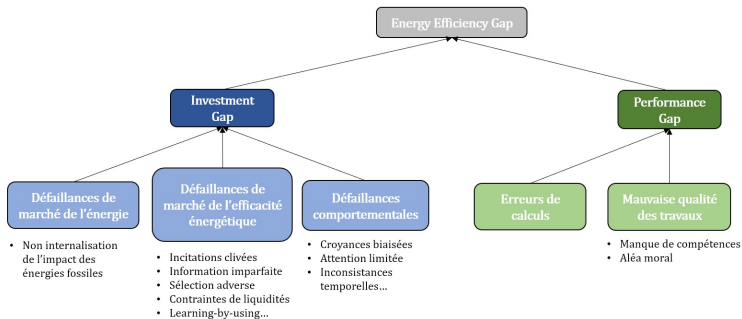
Un Gap entre les prévisions et la réalité



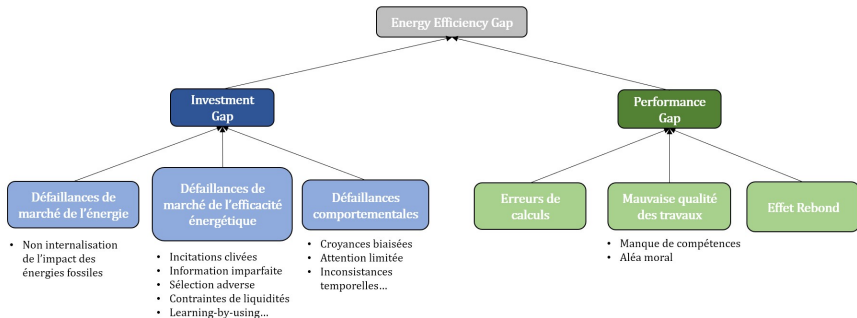
Un Gap entre les prévisions et la réalité



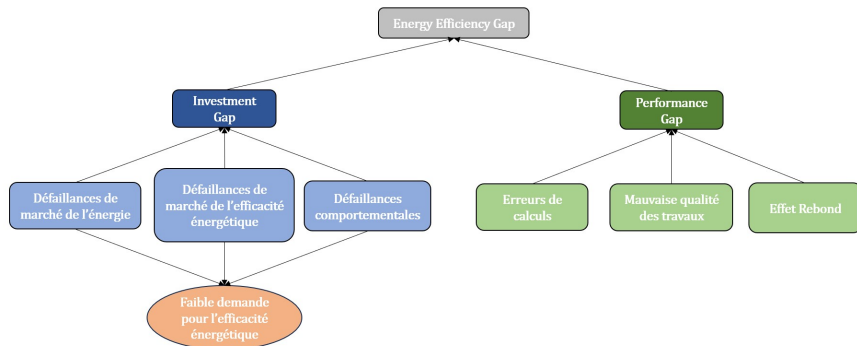
Un Gap entre les prévisions et la réalité



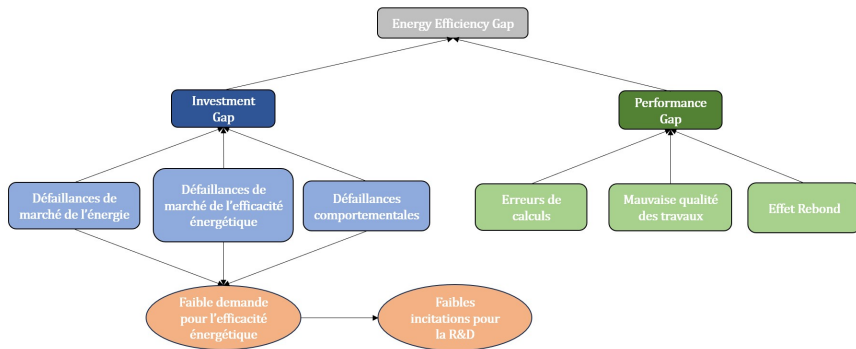
Un Gap entre les prévisions et la réalité



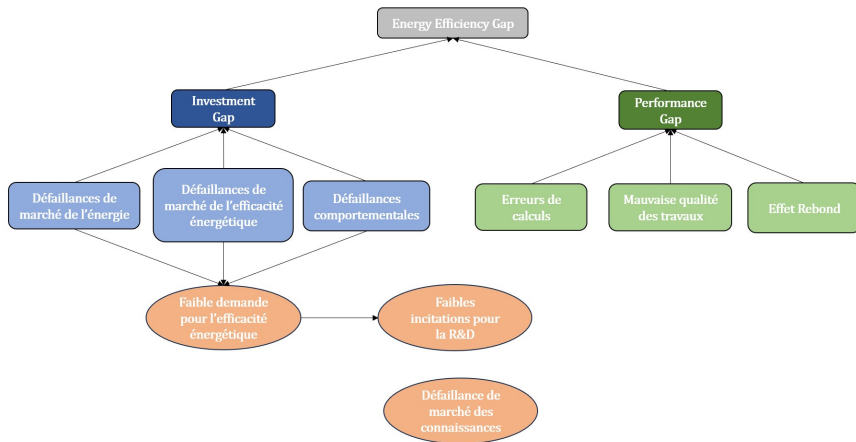
Un Gap entre les prévisions et la réalité



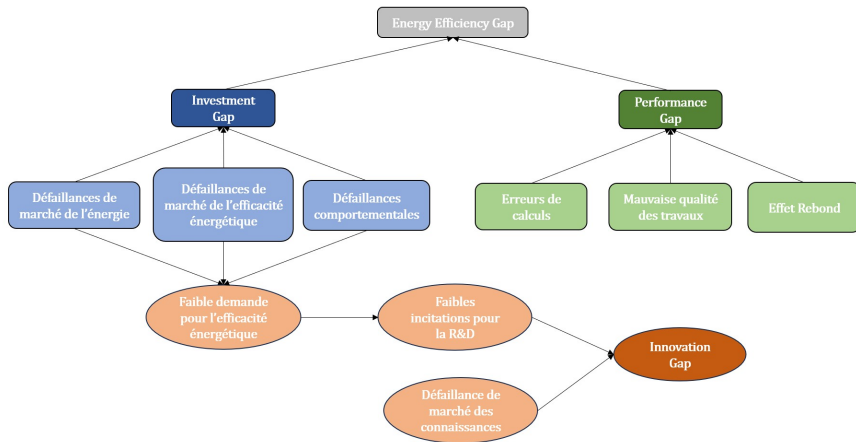
Un Gap entre les prévisions et la réalité



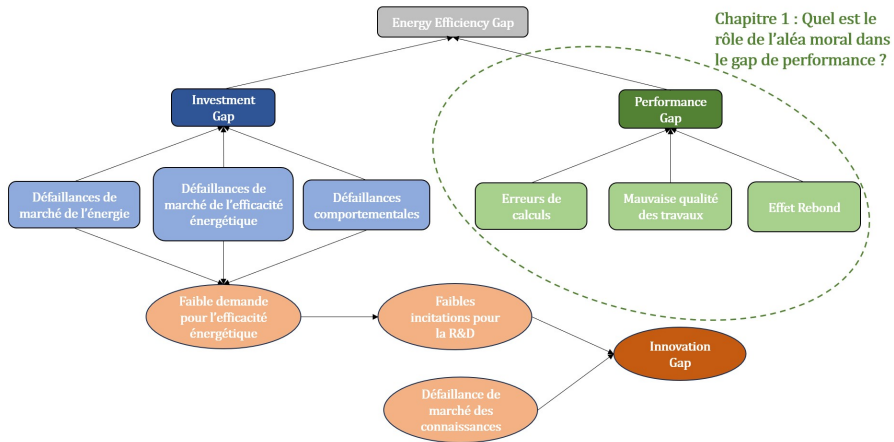
Un Gap entre les prévisions et la réalité



Un Gap entre les prévisions et la réalité



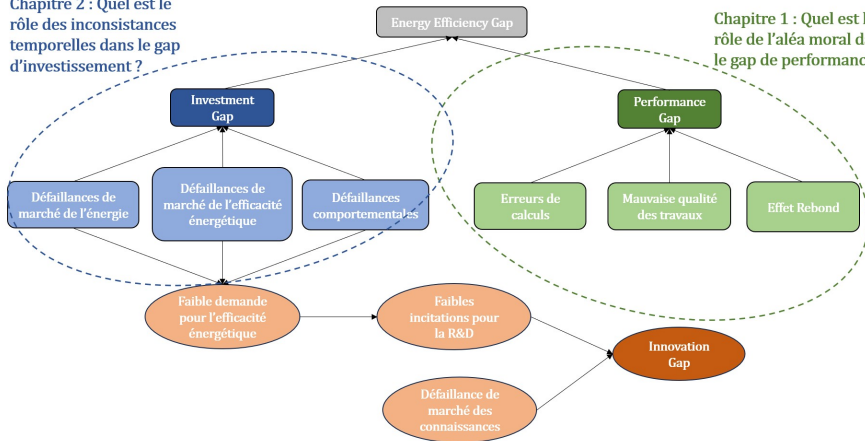
Un Gap entre les prévisions et la réalité



Un Gap entre les prévisions et la réalité

Chapitre 2 : Quel est le rôle des inconsistances temporelles dans le gap d'investissement ?

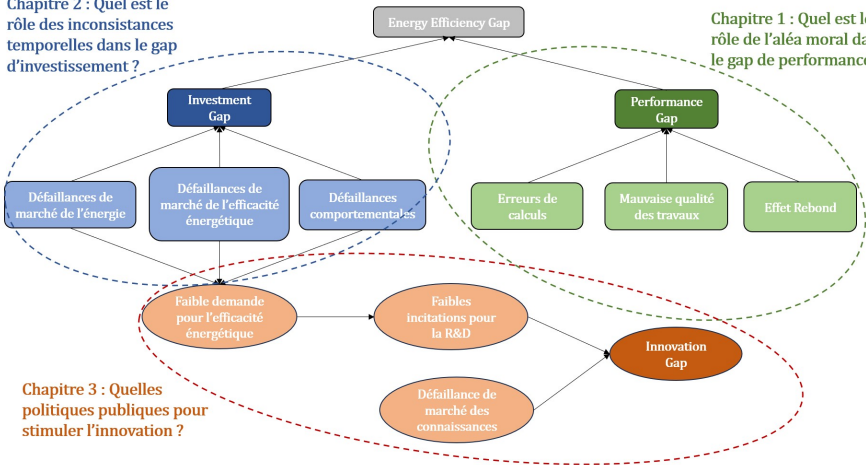
Chapitre 1 : Quel est le rôle de l'aléa moral dans le gap de performance ?



Un Gap entre les prévisions et la réalité

Chapitre 2 : Quel est le rôle des inconsistances temporelles dans le gap d'investissement ?

Chapitre 1 : Quel est le rôle de l'aléa moral dans le gap de performance ?



1 Contexte et motivation

2 Chapitre 1

3 Chapitre 2

4 Chapitre 3

5 Conclusion

6 Annexes

Chapitre 1 – Contexte

Des économies d'énergies réelles après travaux en deçà des prédictions théoriques

- ➔ L'effet rebond n'explique pas systématiquement le gap
- ➔ Un effet certain des erreurs de calculs : manque de prise en compte des spécificités des logements
- ➔ Les défauts dans la réalisation des travaux : une explication souvent négligée

Sous l'hypothèse de l'aléa moral on se demande si ces défauts peuvent être liés à des actions intentionnelles.

Chapter 1 – Question de recherche

Ce qui a déjà été montré :

- Les défauts de travaux $\Rightarrow$ Manque de performance (Aïssani et al. (2016), Alencastro et al. (2018))
- Le contexte informationnel $\Rightarrow$ Manque de performance (Giraudet et al. (2018), Christensen et al. (2023))

Il reste à montrer que :

Le contexte informationnel $\Rightarrow$ Des défauts de travaux

Question de recherche

Quel rôle joue l'asymétrie d'information sur l'existence de défauts dans les travaux d'efficacité énergétique ?

Chapter 1 – Données

Base de données de l'Agence Qualité Construction :

- ➔ 1 587 audits de projets de rénovation et de construction pour atteindre une très basse consommation ($< 50 \text{ kWh/m}^2$)
 - De 2010 à 2021
 - En France métropolitaine
- ➔ Recensement des défauts et des bonnes pratiques décrits sur plusieurs aspects : la sévérité, l'élément technique, l'origine, les conséquences
- ➔ Création d'une variable dichotomique de difficulté à vérifier le défaut par un non-expert (ex : éclairage V.S. isolation)

Chapter 1 – Méthodes

Sur la probabilité de défauts : $P(\text{Défaut} = 1) = f(\text{Vérif}, \mathbf{X})$

- ➔ Régressions logistiques où la probabilité d'apparition d'un défaut par rapport à une bonne pratique est expliquée par la difficulté à le vérifier
- ➔ Régressions logistiques à effet aléatoire où la difficulté à le vérifier a des effets différenciés par groupes d'éléments techniques par exemple

Sur la sévérité de défauts : $P(\text{Défaut} = \text{Sévérité}) = f(\text{Vérif}, \mathbf{X})$

- ➔ Régression logistique multinomiale où la probabilité qu'un défaut soit un sinistre par rapport à une bonne pratique est expliquée par la difficulté à le vérifier

Chapter 1 – Résultats principaux

- ① Un grand nombre de défauts est observé dans la base
- ② Présence d'**Aléa Moral**...
- ③ ...principalement associé à une baisse de la qualité de l'air, une augmentation de l'humidité et une baisse de la performance des systèmes ⇒ **Cohérent avec le performance gap**
- ④ ...et associé à des sinistres pour les travaux efficacité énergétique uniquement.

Recommandations de politiques

- **Contrôles et de vérifications de la qualité**
- **Bonus et garanties d'efficacité énergétique**
- **Une garantie décennale pour les travaux d'efficacité énergétique ?**

1 Contexte et motivation

2 Chapitre 1

3 Chapitre 2

4 Chapitre 3

5 Conclusion

6 Annexes

Chapitre 2 – Contexte

Un niveau d'investissement aussi en deçà des prédictions des modèles type "ingénieur"

- ➔ Des obstacles inhérents au marché : hétérogénéité des préférences et coûts cachés
- ➔ Des défaillances qui retardent l'investissement : agents imparfaitement informés, contraintes de crédit ou incitation clivées
- ➔ Les agents sont-ils vraiment rationnels (au sens de modèle d'utilité escomptée (Samuelson 1937)) ?

Chapitre 2 – Question de recherche

L'incohérence temporelle

- On suppose dans les modèles des agents avec des préférences temporelles constantes
- Les expériences montrent que le taux d'actualisation décroît avec l'horizon temporel
- Un investissement dans l'efficacité énergétique peut être rentable aujourd'hui mais apporter plus d'utilité s'il est reporté dans le futur et ainsi de suite... ⇒ **Comportement de procrastination**

Question de recherche

Quel degrés d'incohérences temporelles est présent dans l'investissement en efficacité énergétique ?

Chapitre 2 – Méthodes

Application à l'investissement dans les systèmes de chauffage

- ① Un choix expérimental en deux parties avec des horizons temporels différents sur plus de 3000 propriétaires : le système de chauffage devra être remplacé dans 1, 5, 10, 15 ans.
- ② L'estimation des préférences avec un modèle à paramètres aléatoires pour prendre en compte l'hétérogénéité des propriétaires
- ③ L'identification du facteur d'actualisation pour les deux horizons temporelles
- ④ L'identification du niveau de biais pour le présent de chaque propriétaire
- ⑤ L'évaluation du bien-être à reporter l'investissement dans les cas avec et sans incohérences temporelles.

Chapitre 2 – Résultats principaux

- Un taux d'actualisation moyen de 24% qui diminue avec l'horizon temporel de l'investissement ⇒ **Biais pour le présent**
- 72% des répondants se révèlent être biaisés pour le présent
- Pour des prix entre 2 000 et 10 000 €, la prise en compte des incohérences temporelles diminue le nombre d'investissements de 13% par rapport à un modèle d'actualisation classique.

Recommandations de politiques

- **Tarification carbone ou subvention supplémentaire pour palier la rationalité limitée des agents**
- **Nudges et échéances d'aides pour limiter les comportements de procrastination**

1 Contexte et motivation

2 Chapitre 1

3 Chapitre 2

4 Chapitre 3

5 Conclusion

6 Annexes

Chapitre 3 – Contexte et Question de recherche

- L'innovation bas carbone dans les bâtiments est vecteur de co-bénéfices économiques, sociaux, sanitaires et environnementaux importants.
- L'innovation verte dans les bâtiments est entravée par :
 - ① la nature de bien public de la connaissance et la dépendance au sentier
 - ② une demande faible de biens décarbonés due au faible prix des émissions
 - ③ **une demande faible de biens d'efficacité énergétique due aux différentes barrières à l'investissement**

Question de recherche

La tarification carbone permet-elle de rediriger l'innovation dans le contexte de l'Energy Efficiency Gap ?

Chapter 3 – Données

Mesurer l'innovation verte dans les bâtiments

- ➔ Données de brevets relatifs aux innovations vertes dans les bâtiments de 1970 à 2017 :
 - ① Énergies renouvelables
 - ② Systèmes de chauffage, ventilation et air conditionné
 - ③ Enveloppe et isolation
- ➔ Création d'un indicateur de qualité des brevets

Les politiques pour stimuler la demande

- ➔ La tarification du carbone proxy par la facture énergétique
- ➔ Les taux de subvention dans chaque catégorie technologique
- ➔ Les réglementations thermiques successives de la RT74 à la RT2012

Chapter 3 – Méthodes

Polynomial distributed lag model :

- ① Permet d'estimer les effets retardés de la politique sur l'innovation
- ② Permet de réduire la multicolinéarité entre les différentes variables retardées
- ③ Permet de réduire le nombre de paramètres à estimer
- ④ Permet d'obtenir des effets cumulés et non linéaires dans le temps

Chapter 3 – Résultats principaux

- ① Les prix de l'énergie n'ont pas d'effet sur l'innovation bas carbone dans les bâtiments (ou même un effet négatif)
- ② + 1 pp taux de subvention $\Rightarrow$ + 5, 11 et 17 brevets qualitatif dans les ENR, Enveloppe, et HVAC
- ③ Les réglementations thermiques ont un fort effet positif mais éphémère : + 29 pour la RT88, 45 RT2005 et 216 RT2012

Recommandations de politiques

- **La tarification carbone n'est pas toujours un instrument efficace pour rediriger l'innovation**
- **Résoudre les défaillances de marché pour stimuler la demande**
- **Les standards doivent être rehaussés régulièrement pour entretenir la dynamique d'innovation**

1 Contexte et motivation

2 Chapitre 1

3 Chapitre 2

4 Chapitre 3

5 Conclusion

6 Annexes

Conclusion générale

- Une thèse relevant principalement de :
 - L'économie de l'efficacité énergétique
 - L'économie de l'information
 - L'économie comportementale
 - L'économie de l'innovation
- Des bases de données originales :
 - Des audits de travaux
 - Des choix expérimentaux
 - Des brevets
- Nouvelles perspectives sur l'Energy Efficiency Gap :
 - L'aléa moral → pourquoi nous n'atteignons pas le niveau BBC lors de rénovations d'ampleurs ?
 - L'incohérence temporelle → pourquoi une partie des investissements rentables ne sont pas déclenchés ? (les 5% de la note du CAE (Fack, G., & Giraudet, L. G. (2024) ?)
 - En présence de défaillances de marché → subventions et réglementations permettent de stimuler l'adoption et les incitations à innover. La RE2020 et l'empreinte carbone, l'innovation est-elle en route ?

1 Contexte et motivation

2 Chapitre 1

3 Chapitre 2

4 Chapitre 3

5 Conclusion

6 Annexes

Easyness-to-verify

- La difficulté à vérifier **par un non expert**
- Construite à l'aide d'un expert de l'AQC
- Objectif, Systématique et Répliquable car basée sur l'élément technique du défaut
- Pas de manipulation possible

Facile à vérifier

Détecteur de présence lumières

Stores pare-soleil

Fonctionnement convecteurs

Distribution ECS

...

Difficile à vérifier

Ampoule BC

Isolation toiture, plancher

Qualité de la laine isolante

Récupérateur chaleur eaux grises

...

Measurement error → Attenuation bias

Cadre MCO

Spécification réelle : $P(D = 1) = \alpha + \beta \text{Verif}^* + e$ avec
 $\text{cov}(\text{Verif}^*, e) = 0$

Ce qu'on observe : $\text{Verif} = \text{Verif}^* + \eta$

Ce qu'on estime en réalité : $P(D = 1) = \alpha + \beta \text{Verif} + (e - \beta \eta)$
 avec

$$\begin{aligned} \text{cov}(\text{Verif}, e - \beta \eta) &= \text{cov}(\text{Verif}^* + \eta, e - \beta \eta) \\ &= \text{cov}(\text{Verif}^*, e) + \text{cov}(\text{Verif}^*, -\beta \eta) + \\ &\quad \text{cov}(\eta, e) + \text{cov}(\eta, -\beta \eta) \\ &= -\beta \text{Var}(\eta) \end{aligned}$$

Measurement error → Attenuation bias

$$\begin{aligned}\Rightarrow \hat{\beta} &= \frac{\text{cov}(\text{Verif}, \alpha + \beta \text{Verif} + (e - \beta \eta))}{\text{Var}(\text{Verif})} \\ &= \beta - \beta \frac{\text{Var}(\eta)}{\text{Var}(\text{Verif})} \leq \beta\end{aligned}$$

L'aléa moral est sous estimé en présence d'erreurs de mesure

La méthode idéale serait d'utiliser une VI mais aucune pertinente dans la base.

Confusion matrix

Plutôt pour évaluer la qualité de prédiction du modèle. Ce qui nous intéresse c'est le pouvoir explicatif de la difficulté à vérifier par un non expert.

Mais...

Full sample		
Prediction	Reference	
	Bonnes pratiques	Défauts
Bonnes pratiques	1099	1117
Défauts	2661	7297

⇒ **73% de défauts correctement classés (74% pour l'échantillon efficacité énergétique)**

44 / 54

Auditor effect

	Energy Efficiency sample		
	Minor	Medium	Major
Intercept			
(Intercept)	0.102 (0.126)	-0.716*** (0.143)	-2.912*** (0.352)
Verifiability (<i>ref. Easy-to-verify</i>)			
Hard-to-verify	0.236*** (0.058)	0.310*** (0.068)	0.657*** (0.171)
Status (<i>ref. En cours</i>)			
Terminé	-0.132 (0.127)	-0.017 (0.152)	0.217 (0.493)
Type (<i>ref. Existant</i>)			
Neuf	-0.039 (0.067)	0.446*** (0.076)	0.344 (0.191)
Label group (<i>ref. NoLabel</i>)			
Label	-0.238*** (0.064)	0.075 (0.073)	-0.031 (0.184)
Sector group (<i>ref. Coll_Housing</i>)			
Education	-0.000 (0.099)	0.187 (0.112)	-0.248 (0.242)
Ind_Housing	0.035 (0.088)	-0.056 (0.103)	-1.107*** (0.259)
Office	-0.152 (0.094)	-0.198 (0.109)	-0.893*** (0.267)
Other	0.069 (0.114)	0.041 (0.132)	-0.289 (0.296)
Surface			
	-0.000 (0.000)	0.000* (0.000)	0.000 (0.000)
Organization (<i>ref. Agence Qualité Construction</i>)	YES	YES	YES

Note: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$.

Marginal effects

- Les effets marginaux peuvent être déduit de la régression MCO dans les test de robustesse.
- Sinon calcul à partir de la prédiction du modèle :

Marginal Effect of Hard-to-Verify	
Sample	
Full	0.06
Renovation	0.07
Construction	0.05
Energy Efficiency	0.06
Non-Energy Efficiency	0

⇒ **Le caractère difficile à vérifier d'un travaux augmente la probabilité de défaut de 6 pp**

Garantie décennale

Depuis 1978 garantie légale par l'entrepreneur pour un délai de 10 ans à compter de la réception de l'ouvrage.

- Obligation d'assurance
- 1er critère : tous les défauts affectant la solidité et la structure du bâtiment (fondation, assainissement, canalisations...)
- 2ème critère : inaptitude de bâtiment à être utilisé tel que prévu lors de la conception (infiltration d'eau, parking inutilisable...)
- 3ème critère ? Jurisprudence 2017 : les équipements techniques qui rendent l'usage du bâtiment impropre à sa destination (système de chauffage).
- L'évolution vers l'efficacité énergétique tenant l'entrepreneur responsable du manque de performance si un certain niveau d'efficacité n'est pas atteint.

L'évolution du papier

Améliorer la causalité

La variable label indique les projets qui ont donné lieu à l'attribution d'un label BBC $\Rightarrow$ les artisans s'attendent alors à être contrôlés sur la qualité de leurs travaux.

Echantillon avec label

$$P(D = 1) = \alpha + \beta^{Label} \text{Verif} + e$$

Echantillon sans label

$$P(D = 1) = \alpha + \beta^{NoLabel} \text{Verif} + e$$

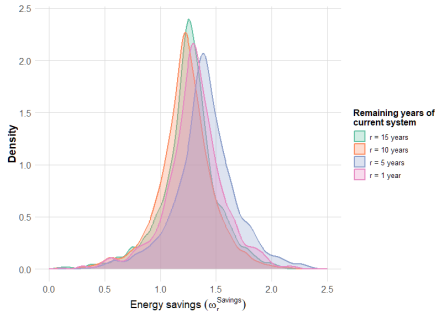
$$\text{Aléa Moral} \Rightarrow \beta^{Label} < \beta^{NoLabel}$$

Design

- Volonté de conserver l'hétérogénéité dans l'identification du biais pour le présent → deux taux d'actualisation par répondant
- Effet d'ordre et d'apprentissage inhérent au choix XP. Dans notre enquête :
 - ① 30% de complétion (parmi ceux qui ont cliqué) !
 - ② Les cartes de choix sont aléatoires
 - ③ Les deux expériences de choix sont espacées par deux questionnaires simples
 - ④ Les régressions sont contrôlées par le temps passé sur l'enquête
 - ⑤ Les répondants inattentifs sont éliminés par une carte de choix évidente qui dépend du répondant
 - ⑥ Effet d'apprentissage diminue la variance, l'effet de fatigue l'augmente...: une littérature pas toujours claire sur la difficulté des expériences (Bech, M., Kjaer, T., Lauridsen, J. (2011), Hess, S., Hensher, D. A., Daly, A. (2012))

Distributions

Économies d'énergies



- 1 L'horizon temporel n'a pas d'effet sur les préférences
- 2 Peut être lié à de l'attention limitée : les ménages se focalisent sur le prix et choisissent ensuite un niveau d'efficacité énergétique
- 3 Le biais pour le présent est donc principalement porté par le coût initial de l'investissement, le coût d'investir maintenant VS le coût d'investir demain

Comment utiliser ce biais ?

Utiliser les données et l'intelligence artificielle pour mieux cibler les politiques

- Un premium pour le report plus important pour

- ① les faibles revenus
- ② les propriétaires occupants
- ③ les systèmes centralisés
- ④ les systèmes peu efficaces

- Une BDND qui comprend :

- ① L'ancienneté du système de chauffage
- ② Le type de système
- ③ Le DPE

- Coupler à des données socio-démo graphiques

→ Nudge informatif sur le coût de reporter l'investissement

Novelty score

- Diversité des classes technologiques des citations backwards : originality (Trajtenberg et al., 1997; Rosenkopf and Nerkar, 2001; Schoenmakers and Duysters, 2010)
- Recombinaison technologique quand un brevet utilise une combinaison technologique qui n'a jamais été utilisé avant (Verhoeven et al. 2016)
- Analyse sémantique des descriptions de brevets : un brevet qui utilise des mots qui ne sont jamais apparu avant (Kelly et al. 2021)

La facture énergétique

Le mécanisme demand-pull

(La tarification du carbone) → **Augmentation du coût des technologies émettrices** → **Augmentation de la demande de biens décarbonés** → **Incitations à innover**

- Les ménages n'ont pas connaissances ni du prix ni du niveau de taxe et raisonnent donc en terme de coût du service énergétique : augmentation de la facture → augmentation de la demande
- Tests de robustesse avec les prix de l'énergie