

L'efficacité énergétique dans les foyers français : quelle performance pour quel coût ?

Edouard Civel

Chaire Économie du Climat
Université Paris-Dauphine

Direction Générale du Trésor - Séminaire Fourgeaud
7 Décembre 2016

La Commission Européenne a fixé plusieurs objectifs énergétiques pour les décennies à venir :

- Paquet Énergie-Climat 2020 : 3x20%
- Paquet Énergie-Climat 2030
 - 40% de réduction des émissions de gaz à effet de serre,
 - 27% d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale,
 - 27% d'économies d'énergie par rapport à un scénario "business-as-usual".

La Commission Européenne a fixé plusieurs objectifs énergétiques pour les décennies à venir :

- Paquet Énergie-Climat 2020 : 3x20%
- Paquet Énergie-Climat 2030
 - 40% de réduction des émissions de gaz à effet de serre,
 - 27% d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale,
 - 27% d'économies d'énergie par rapport à un scénario "business-as-usual".

⇒ L'objectif d'efficacité énergétique demeure flou :

- Pas de déclinaison sectorielle,
- Objectif non contraignant...

⇒ en dépit d'un rôle-clef dans la transition énergétique.

Chevalier, Cruciani and Geoffron (2013),

De Perthuis and Jouvet (2013),

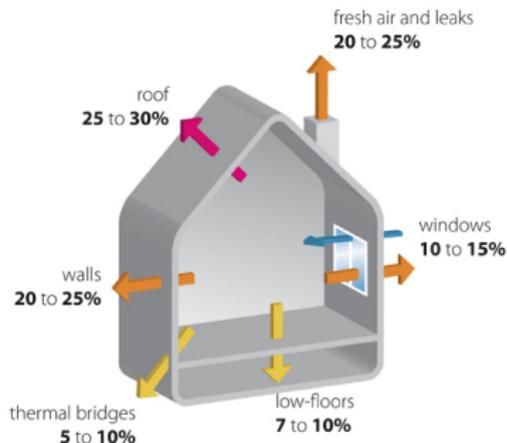
Weizsäcker (2009).

Le bâtiment, un secteur très intense en énergie

- 28% de la consommation d'énergie finale de la France est dédiée aux bâtiments résidentiels et plus de 60% de cette énergie est consacrée à la production de chaleur ambiante...

Le bâtiment, un secteur très intense en énergie

- 28% de la consommation d'énergie finale de la France est dédiée aux bâtiments résidentiels et plus de 60% de cette énergie est consacrée à la production de chaleur ambiante...
- autant d'économies potentielles.



Revue de la littérature :

- Des études de cas sur l'optimisation technico-économique : *Ferrara et al. (2013)*, *Terés-Zubiaga et al. (2015)*.
- Des études conjecturent le coût d'une rénovation lourde d'un parc de bâtiments indifférencié : *Boermans et al. (2012)*, *Lechtenböhrmer and Schüring (2011)*.
- Des estimations bottom-up de la consommation d'énergie des logements français ont été construites, mais sans inclure des options de rénovation : *Ribas Portella (2012)*, *Mata et al. (2014)*.

Revue de la littérature :

- Des études de cas sur l'optimisation technico-économique : *Ferrara et al. (2013)*, *Terés-Zubiaga et al. (2015)*.
- Des études conjecturent le coût d'une rénovation lourde d'un parc de bâtiments indifférencié : *Boermans et al. (2012)*, *Lechtenböhrmer and Schüring (2011)*.
- Des estimations bottom-up de la consommation d'énergie des logements français ont été construites, mais sans inclure des options de rénovation : *Ribas Portella (2012)*, *Mata et al. (2014)*.

Question de recherche

Comment les coûts d'investissements évoluent-ils avec l'objectif d'efficacité du parc existant ?

Introduction

Optimisation de la rénovation d'un bâtiment
Optimisation sur le parc résidentiel français
Mise en perspective des leçons du modèle
Conclusion et suite des travaux

En Europe, l'Union Énergétique
La rénovation thermique du parc résidentiel
Question de recherche

- 1 Introduction
- 2 Optimisation de la rénovation d'un bâtiment
- 3 Optimisation sur le parc résidentiel français
- 4 Mise en perspective des leçons du modèle
- 5 Conclusion et suite des travaux

- 1 Introduction
- 2 Optimisation de la rénovation d'un bâtiment
 - Description d'un parc différencié
 - Évaluation de la performance thermique
 - Modèle thermique
 - Technologies et coûts
 - Optimisation de la rénovation d'un bâtiment
 - Résultats pour les maisons
 - Résultats pour les immeubles
- 3 Optimisation sur le parc résidentiel français
- 4 Mise en perspective des leçons du modèle

Le parc résidentiel français est décrit au moyen de 6 archétypes de maisons et de 18 d'immeubles. :

- Les maisons partagent toutes la même architecture, mais leurs caractéristiques thermiques varient selon la période de construction.
- Les immeubles varient à la fois par leur période de construction et leur architecture (nombre d'étages, etc.).

Parc de maisons individuelles

Période construction	% du parc de MI	Nb de MI
Rurale <74	8,4%	1 595 588
Bourgeoise < 74	1,2%	232 085
Bourg < 74	11,1%	2 117 780
Eclectique < 48	3,5%	667 246
Banlieue < 48	9,3%	1 769 652
48-67	11,1%	2 104 256
67-74	8,7%	1 659 694
75-81	11,2%	2 127 450
82-89	10,3%	1 963 800
90-2000	11,2%	2 127 450
2001-2005	5,9%	1 125 000
2006-2013	8,1%	1 549 000
Total	100,0%	19 039 001

Parc de logements collectifs

Type d'immeuble	% du parc LC	Nb de logements
Immeuble de bourg	9,68%	1 426 040
Immeubles Haussmannien	8,80%	1 296 400
Immeuble éclectique	3,52%	518 560
Immeuble HBM	0,88%	129 640
Immeuble Pastiche	2,64%	388 920
Immeuble bourgeois	1,76%	259 280
Habitat intermédiaire 68-74	2,64%	388 920
Petit collectif divers 48-74	17,61%	2 592 800
Barres 48-74	10,57%	1 555 680
Tours 48-74	0,88%	129 640
Habitat intermédiaire 75-81	0,88%	129 640
Petit collectif divers 75-81	4,40%	648 200
Barres 75-81	5,28%	777 840
Tours 75-81	0,88%	129 640
Immeubles 82-89	7,04%	1 037 120
Immeubles 90-2000	9,68%	1 426 040
Immeubles 2001-2005	4,11%	605 000
Immeubles 2006-2013	8,73%	1 285 000
Total	100,00%	14 724 360

Construction d'un indicateur de performance thermique : U_G .

- Chacune des quatre composantes de l'enveloppe du bâtiment est caractérisé par son coefficient de transfert thermique surfacique U [$W/(K.m^2)$].
- L'indicateur de performance thermique du bâtiment est estimé par la moyenne des U-values pondérées par les surfaces respectives des composantes de l'enveloppe : cet indicateur est désigné par U_G .

Lier la performance thermique et la consommation de chaleur

$$Cons_{feh}(U_G) = \frac{U_G * A_{enveloppe} * D_{h.ref} * I(U_G)}{Boil_{eff} * L_s * 10^3} [kWh/(m^2.year)] \quad (1)$$

- U_G : performance thermique globale du bâtiment [W/(K.m²)]
- $A_{enveloppe}$: surface totale de l'enveloppe [m²]
- $D_{h.ref}$: besoin annuel de chaleur, fixé au climat "moyen" dans le module [K.h]
- $Boil_{eff}$: coefficient d'efficacité de la chaudière
- L_s : surface habitable du logement [m²]
- $I(U_G)$: facteur d'intermittence

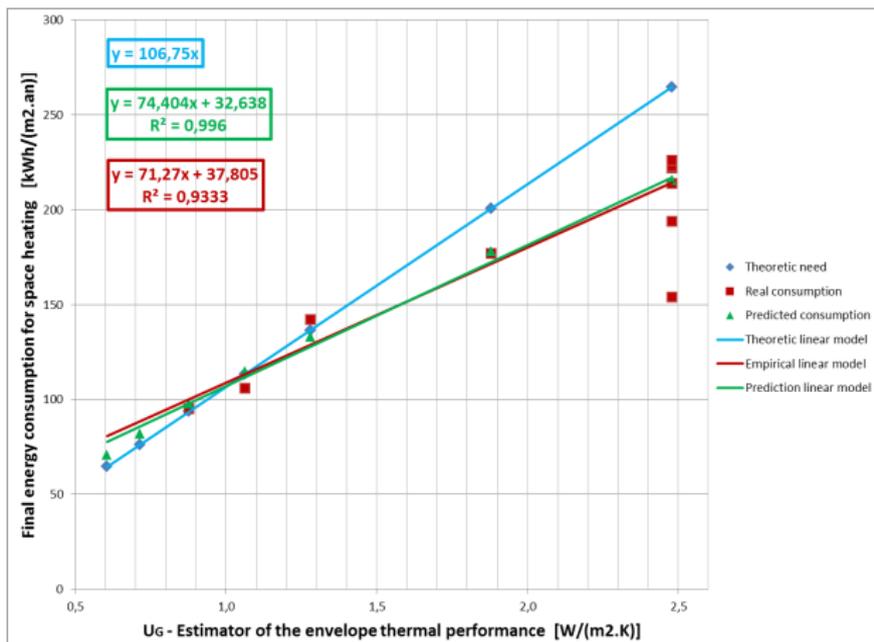


FIGURE: Modèles thermiques : théorique, prédictif et empirique

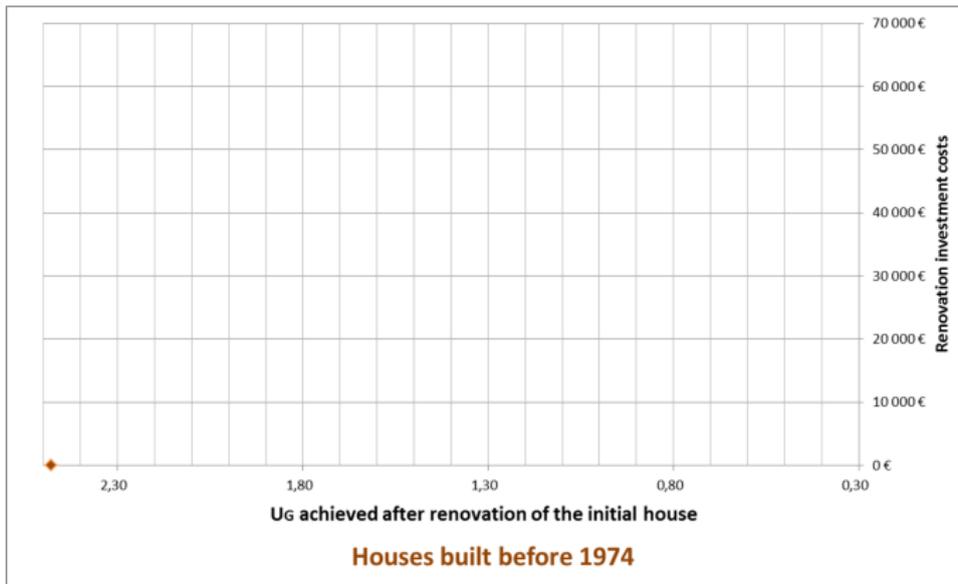
Utilisation de Bâtiprix, base de données sur les différentes options de rénovation thermique et sur leurs coûts associés (matériaux et main d'oeuvre).

- Isolation des murs : par l'intérieur avec de la laine de verre ou par l'extérieur avec du polystyrène expansé.
- Renouvellement des fenêtres : double ou triple-vitrage, argon.
- Isolation du sol : laine de roche en sous-face.
- Isolation de la toiture : laine minérale pour les maisons / polyuréthane pour les toit-terrasses des immeubles.

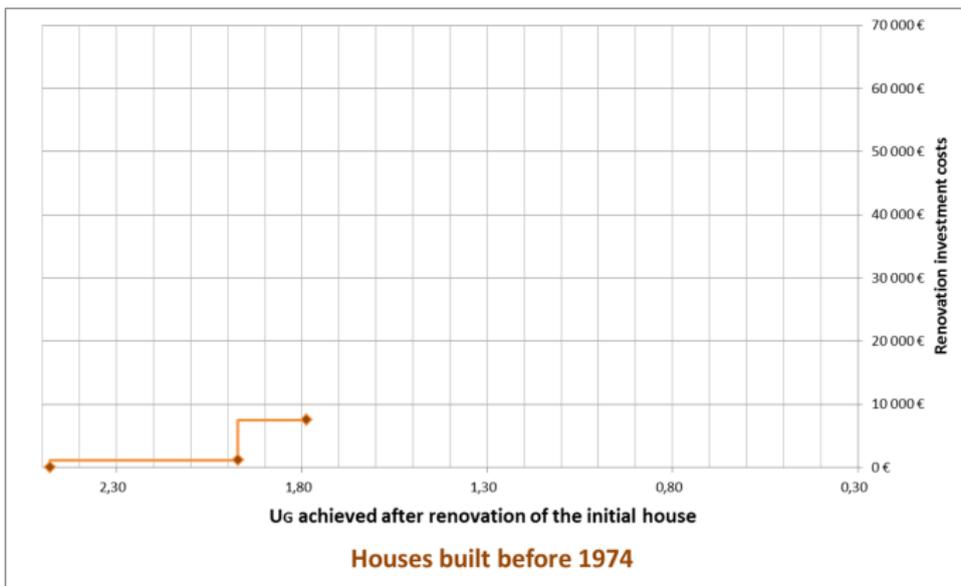
Structure de l'algorithme : entrées et sorties



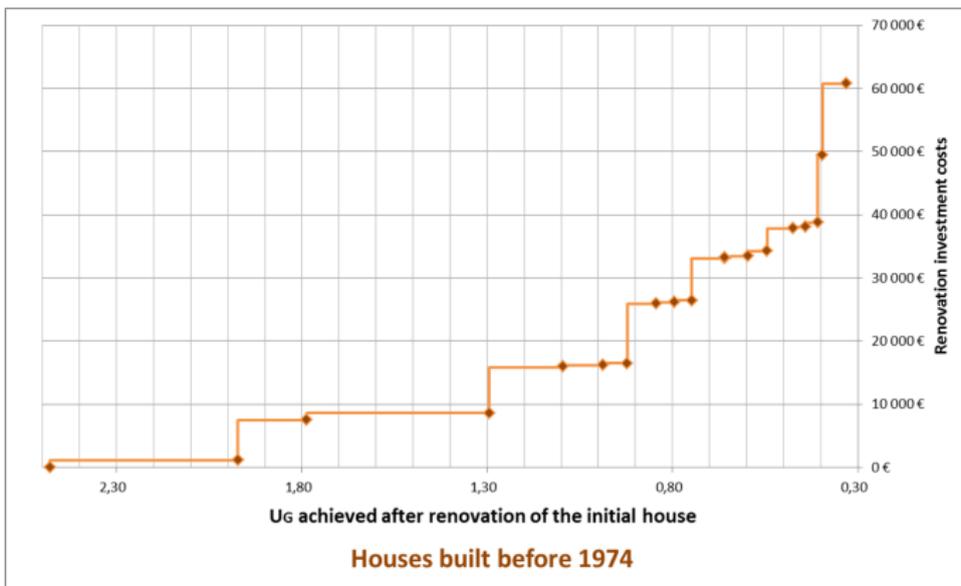
Rénovation d'une maison construite avant 1974



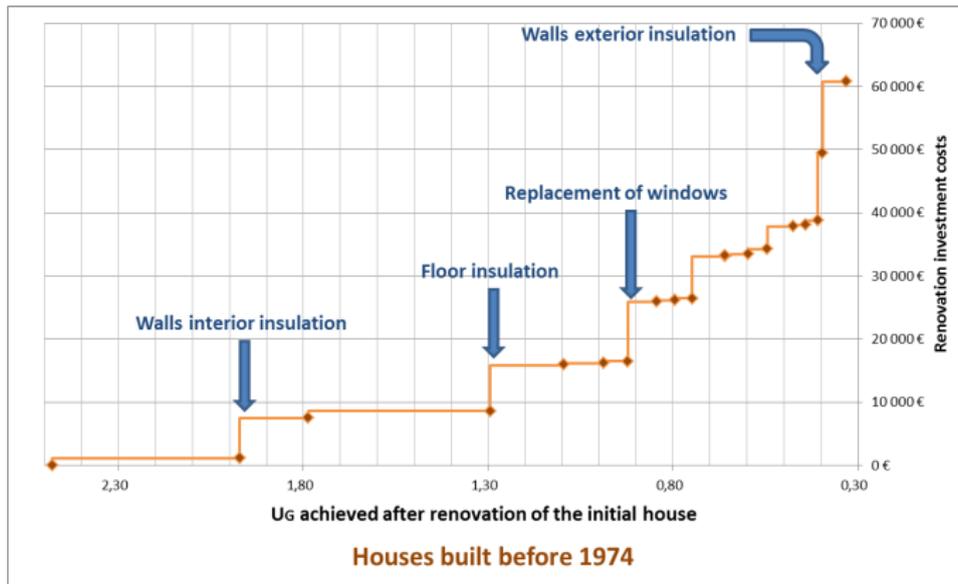
Rénovation d'une maison construite avant 1974



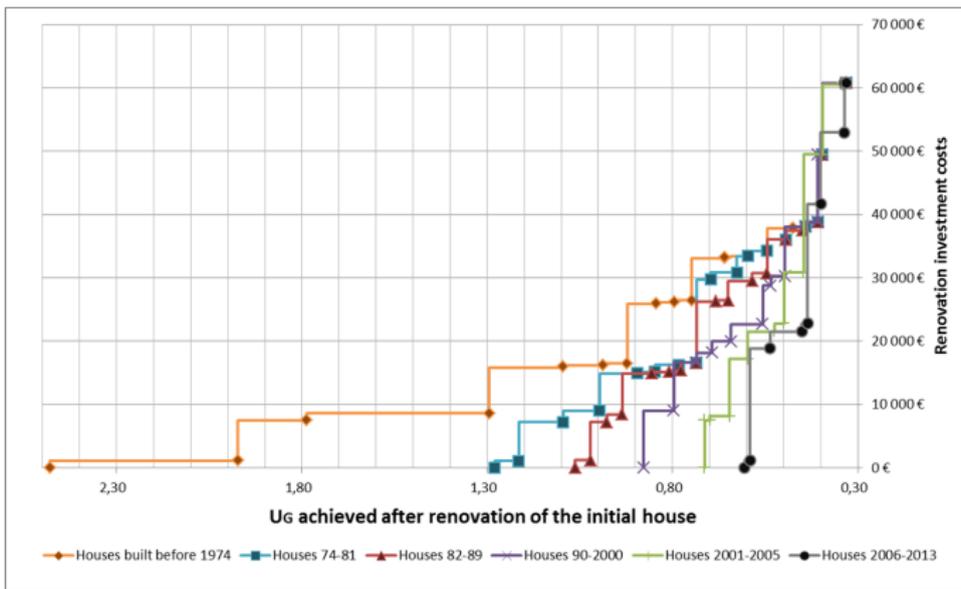
Rénovation d'une maison construite avant 1974



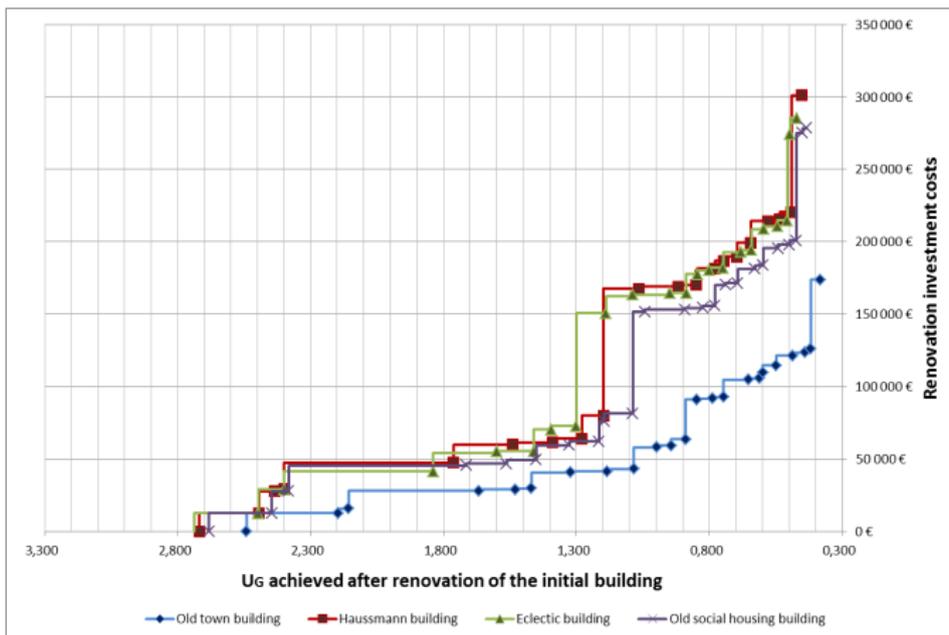
Rénovation d'une maison construite avant 1974



Courbes de rénovation pour les différentes maisons type



Rénovation des immeubles antérieurs à 1945



- 1 Introduction
- 2 Optimisation de la rénovation d'un bâtiment
- 3 Optimisation sur le parc résidentiel français
 - Second algorithme
 - Résultats sur le parc résidentiel
- 4 Mise en perspective des leçons du modèle
- 5 Conclusion et suite des travaux

Structure du second algorithme : entrées et sorties



Une évolution exponentielle des coûts...

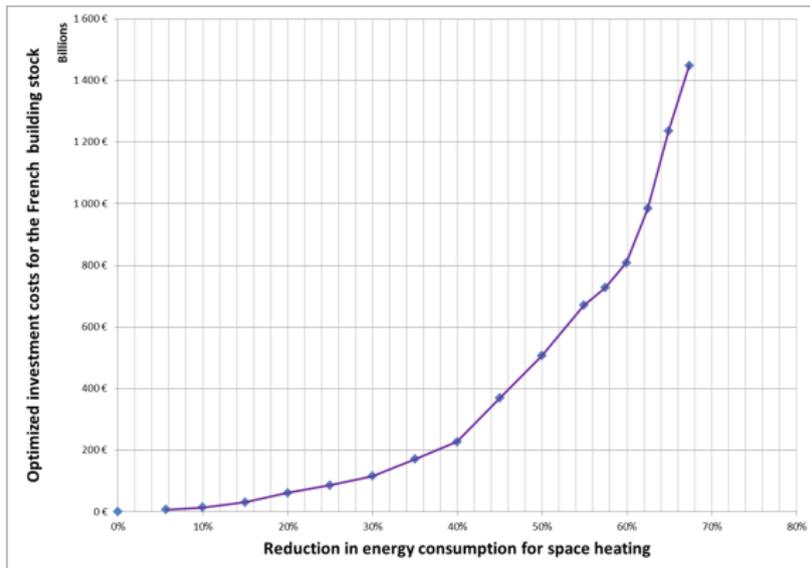


FIGURE: Coût d'investissement global sur le stock résidentiel français

Ou une courbe linéaire avec 2 points d'inflexion ?

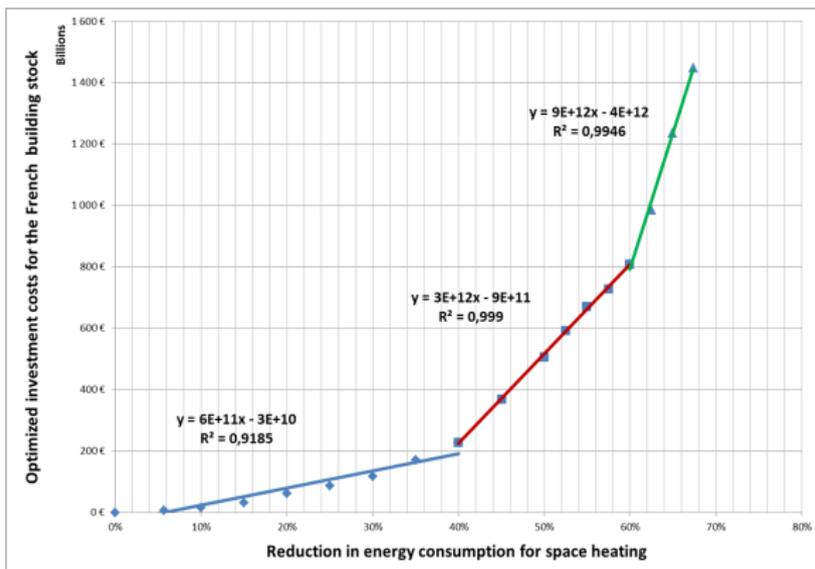


FIGURE: Global investment costs on French residential stock

Analyse des points d'inflexion

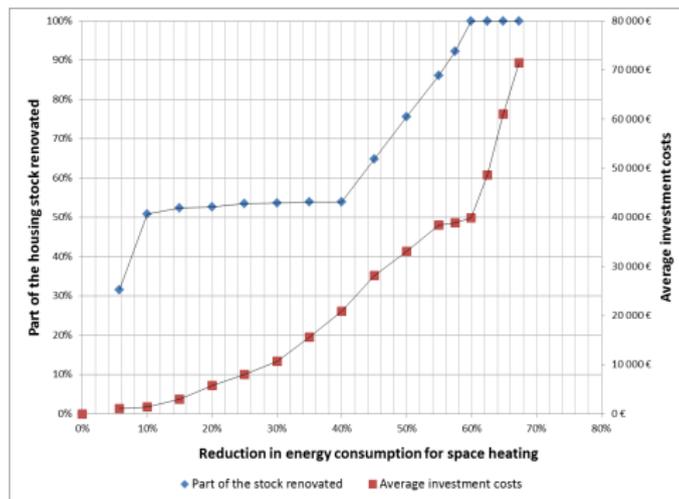


FIGURE: Comparaison nombre de rénovations /
montant moyen des investissements réalisés

Coûts d'investissement du parc résidentiel français

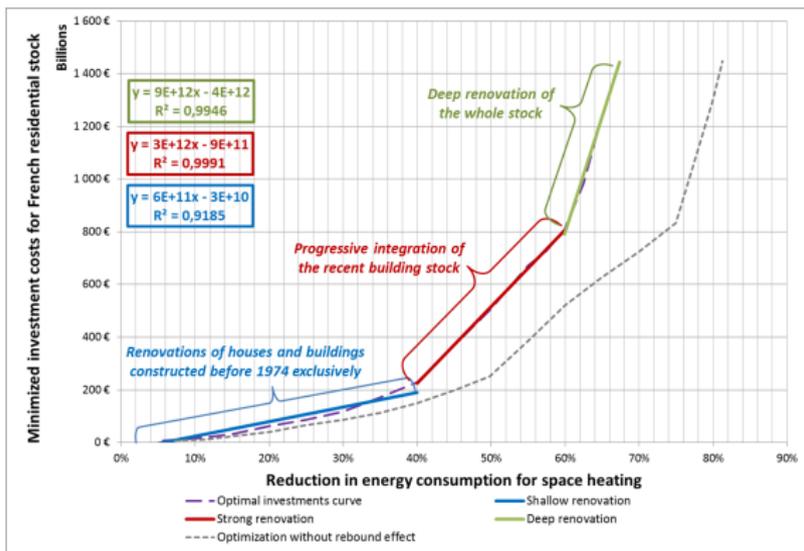


FIGURE: La linéarité par morceaux expliquée

Coûts d'investissement du parc résidentiel français

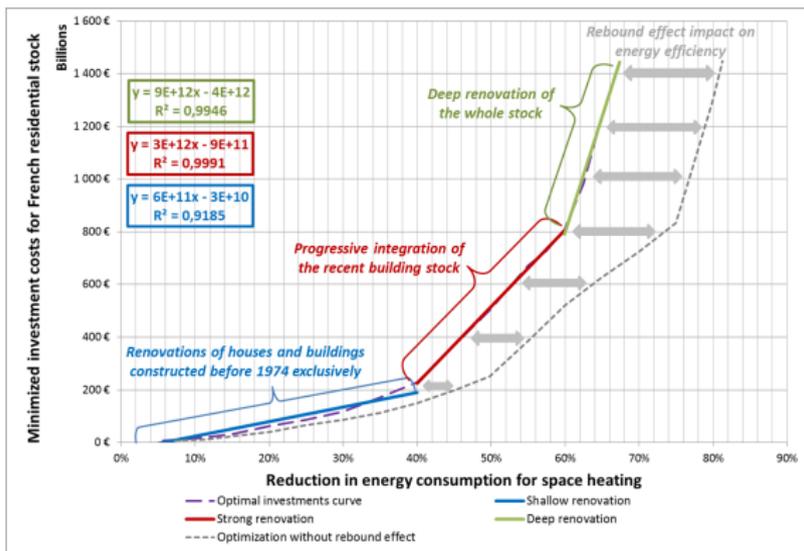


FIGURE: La linéarité par morceaux expliquée

- 1 Introduction
- 2 Optimisation de la rénovation d'un bâtiment
- 3 Optimisation sur le parc résidentiel français
- 4 Mise en perspective des leçons du modèle
 - Des effets verrous à l'échelle micro
 - Des surcoûts massifs à l'échelle macro
 - Stratégie de long-terme et incitations par bloc
- 5 Conclusion et suite des travaux

Procéder à de multiples rénovations du même logement ?

- Une possibilité favorisée "a priori" par le taux d'actualisation des ménages,
- Créant d'importants surcoûts :
 - Des surcoûts directs et indirects,
 - Notre modèle permet seulement une estimation des surcoûts directs,
 - En outre, a posteriori, la révélation des coûts cachés rend la seconde rénovation peu probable,

⇒ Une décision sous-optimale.

Les conséquences perverses d'objectifs court-termes

	Yearly investments		Yearly renovations	
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 1	Scenario 2
First decade	27 B€	12 B€	675 172	1 088 000
Second decade	27 B€	33 B€	675 172	1 303 271
Third decade	27 B€	61 B€	675 172	2 025 515
Sum (discounted at the rate of 3.5% for investments)	495 B€	574 B€	20 255 160	44 167 860

FIGURE: Scinder les objectifs d'efficacité énergétique du bâtiment dans le temps de manière uniforme pourrait provoquer d'importants surcoûts, ou bloquer l'atteinte d'objectifs plus ambitieux.

De nombreuses petites rénovations versus des rénovations lourdes ciblées



Or



Quel chemin vertueux pour un parc résidentiel efficace ?



Take-home messages

- L'évolution convexe des coûts d'investissement dans la rénovation du parc résidentiel français ;
- Deux points d'inflexion sont identifiés pour des cibles d'efficacité de 40% puis de 60%, respectivement dûs à un effet quantité puis un effet prix ;
- Certains effets verrou pourraient menacer le gisement d'économies d'énergie ; ces effets devraient être pris en compte par les décideurs publics.

Travaux en cours :

- Introduction des systèmes de production de chaleur dans l'analyse ;
- Mise en dynamique du modèle ;
- Incorporation des mesures fiscales incitatives pour les ménages ;
- ⇒ Développement du modèle Zéphyr Chaleur à la Chaire Économie du Climat, travaux de thèse de Jeremy El Beze.

Travaux en cours :

- Introduction des systèmes de production de chaleur dans l'analyse ;
- Mise en dynamique du modèle ;
- Incorporation des mesures fiscales incitatives pour les ménages ;
- ⇒ Développement du modèle Zéphyr Chaleur à la Chaire Économie du Climat, travaux de thèse de Jeremy El Beze.
- Capitalisation de l'efficacité énergétique dans les prix de l'immobilier : une approche de la "valeur verte",
- Les défaillances d'information dans le marché de la rénovation,
- ⇒ Thèse sur la Valeur de l'Information, financée par Saint-Gobain.

- Merci à mon co-auteur Jeremy Elbeze.
- Merci Raphaël Trotignon, Boris Solier et Christian DePerthuis, notre équipe de la Chaire Économie du Climat.
- Merci à Olivier Teissier du CSTB.
- Merci à vous pour votre attention.

Main references :

- De Pertuis et Jouvét (2013) : *Le Capital Vert*, Odile Jacob.
- Ayong Le Kama (2015) : *La rénovation thermique des logements : quels enjeux, quelles solutions ?*, Commissariat Général au Développement Durable.
- Allibe (2012) : *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français*, Thèse de Doctorat.
- RAGE (2012) : *Analyse détaillée du parc résidentiel existant*.
- Insee (2015) : Enquête *Les conditions de logement fin 2013*.
- Li, Yang et Lam (2013) : *Zero energy buildings and sustainable development implications*, Energy.

Costs/m2	Predicted consumption of final energy for space heating [kWh/(m2.an)]											% ID
	220	180	165	130	115	100	90	80	70	60	55	
ID < 74	0 €	10 €	67 €	77 €	143 €	147 €	236 €	297 €	338 €	442 €	543 €	55%
ID 74-81				0 €	64 €	133 €	145 €	275 €	322 €	442 €	543 €	11%
ID 82-89					0 €	75 €	137 €	236 €	322 €	442 €	543 €	10%
ID 90-2000						0 €	81 €	178 €	271 €	442 €	543 €	10%
ID 2000-05							0 €	73 €	204 €	442 €	540 €	6%
ID 2006-13								0 €	168 €	372 €	473 €	8%

FIGURE: Houses costs matrix

Costs/m2	Predicted consumption of final energy for space heating [kWh/(m2.an)]											% CD
	180	160	120	100	90	80	70	60	50	40	35	
CD < 45	0 €	38 €	47 €	66 €	81 €	166 €	168 €	186 €	191 €	216 €	301 €	23%
CD < 74	0 €	38 €	47 €	66 €	81 €	153 €	167 €	185 €	192 €	216 €	301 €	36%
CD 74-81						0 €	71 €	123 €	148 €	204 €	301 €	11%
CD 82-89								0 €	87 €	202 €	301 €	7%
CD 90-2000								0 €	71 €	133 €	291 €	10%
CD 2001-13									0 €	133 €	281 €	13%

FIGURE: Buildings costs matrix