

# La décarbonation est-elle possible ?

## Essais sur l'économie de la transition énergétique

**Adrien Fabre**

*Paris School of Economics, Université Paris 1*

22 Juin 2020

*Director:*  
Mouez Fodha

*Co-director:*  
Olivier Vidal

*Rapporteurs :*  
Stefan Ambec  
Philippe Quirion

*Autres membres du jury :*  
Antoine Dechezleprêtre  
Katheline Schubert

- ① Ch 1. L'électricité renouvelable est-elle soutenable ?  
→ *Estimation de l'efficacité des technologies électriques selon le mix énergétique.*
- ② Ch 2. Recyclabilité et échéancier de la transition  
→ *Maximisation inter-temporelle de l'extraction de deux ressources finies, dont une recyclable.*
  - > Appendice au Ch 2. Karush-Kuhn-Tucker en horizon infini  
→ *Preuve qu'une solution à un Lagrangien convexe infini est nécessairement optimale.*
- ③ Ch 3. Aversion à la taxe carbone  
→ *Analyse du rejet de la taxe carbone dans le contexte des Gilets jaunes.*
- ④ Ch 4. Les attitudes des Français sur le climat  
→ *Études des connaissances, préoccupations et attitudes des Français face au changement climatique.*

1 L'électricité renouvelable est-elle viable ?

2 Recyclabilité et échéancier de la transition

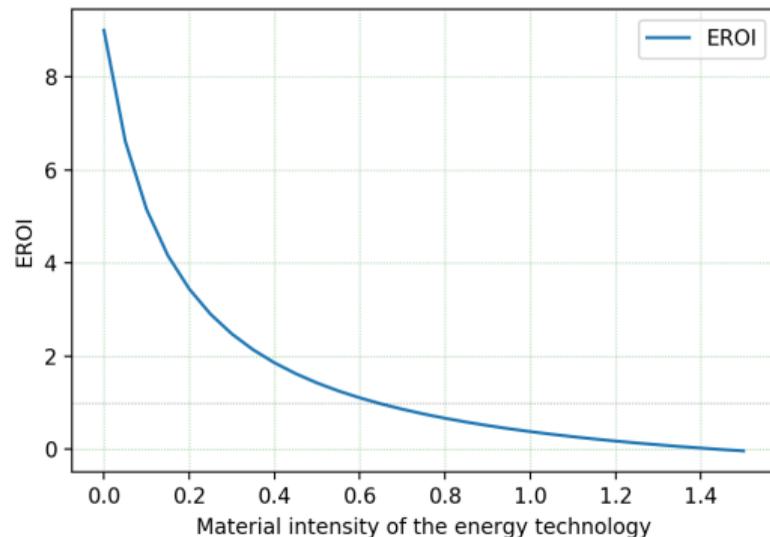
3 Aversion à la taxe carbone

4 Les attitudes des Français sur le climat

## Le taux de retour énergétique (EROI) n'est pas intrinsèque

$a_{i,j}$  : quantité d'intrant  $i$  requis pour produire une unité de produit  $j$ .

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ m_e & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{techno. énergétique} \\ \text{matériaux} \\ \text{énergie} \end{array}$$

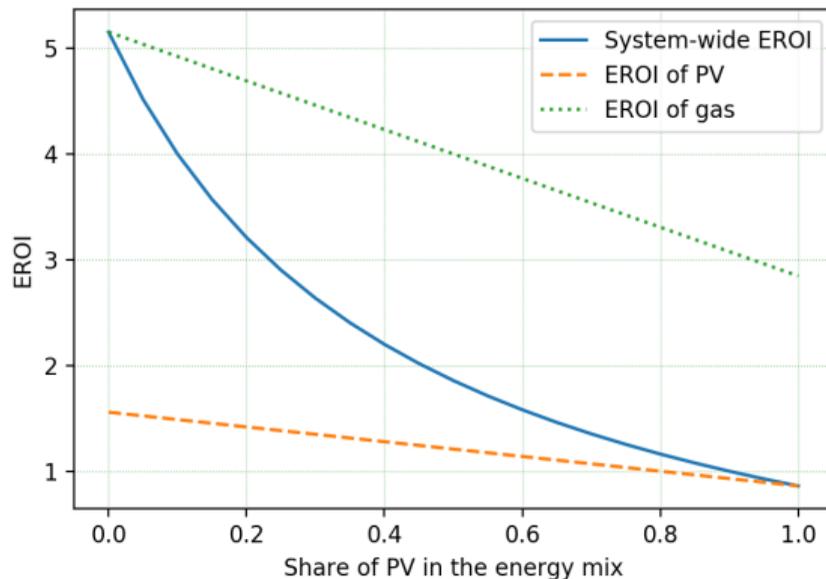
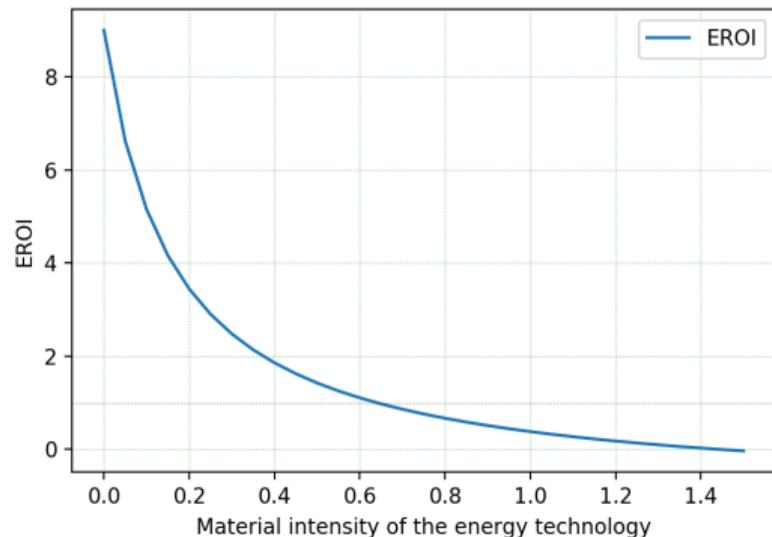


## Le taux de retour énergétique (EROI) n'est pas intrinsèque

$a_{i,j}$  : quantité d'intrant  $i$  requis pour produire une unité de produit  $j$ .

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ m_e & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{techno. énergétique} \\ \text{matériaux} \\ \text{énergie} \end{array}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & p \\ 0 & 0 & 0 & 1-p \\ 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.5 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{PV} \\ \text{gaz} \\ \text{matériaux} \\ \text{énergie} \end{array}$$



## Estimation des EROI présents et futur grâce à THEMIS

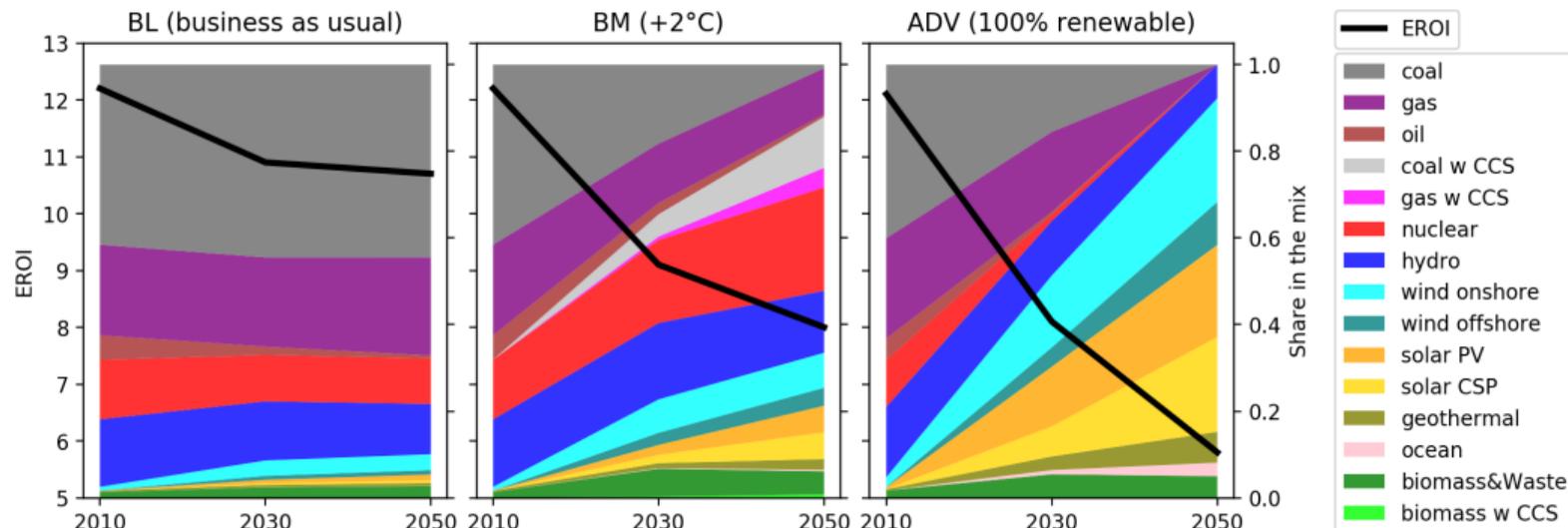


FIGURE – Évolution de l'EROI global des mix de l'électricité pour différents scénarios.

- Les EROI des renouvelables devraient baisser, comme anticipé
- L'EROI global est actuellement de 12, il décroît légèrement jusqu'à 11 dans le scénario *statu quo*
- Déclin bien plus prononcé dans le scénario 100% renouvelable : 6 en 2050
- Étude partielle, n'inclut pas e.g. les transports

## Implications d'un EROI en baisse sur les prix et le PIB

- Empiriquement : relation inverse ( $N=2111$ ,  $R^2 = 0.6$ )

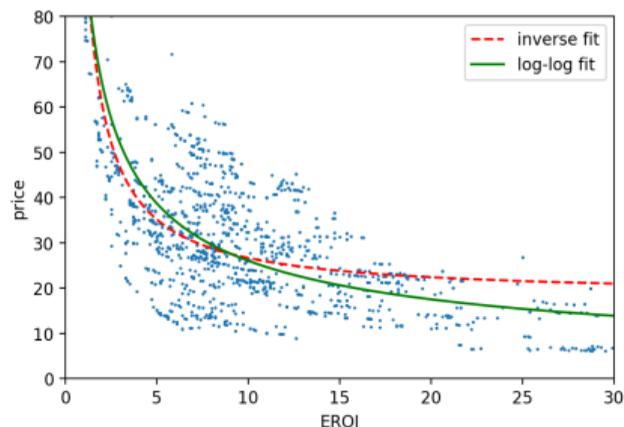


FIGURE – Régressions  $p \sim \text{EROI}$  utilisant les estimations des scénarios.

- Mais en théorie, prix et EROI peuvent décroître en même temps
- Cela dit, le plus probable est qu'un EROI en baisse contribue à augmenter le prix
- En revanche, pas de relation claire avec le PIB, attention avec l'idée d'« EROI viable minimum »

- Expliquer pédagogiquement que l'EROI n'est pas intrinsèque
- En tenir compte pour estimer les EROI électriques dans différents scénarios, y compris un 100% renouvelable
- Montrer qu'on ne doit pas s'inquiéter outre mesure d'une baisse probable de l'EROI
- Contribuer au code d'une librairie python (PyMRIO) pour manipuler des données entrées-sorties

1 L'électricité renouvelable est-elle viable ?

2 Recyclabilité et échéancier de la transition

3 Aversion à la taxe carbone

4 Les attitudes des Français sur le climat

## Le modèle à horizon infini

- Les métaux peuvent être recyclés, pas les fossiles
- Quand doit-on exploiter ces ressources ?
- Le planificateur social bienveillant résout

$$\max \sum_{t \geq 0} \left( \frac{1}{1 + \rho} \right)^t \frac{1}{1 - \varepsilon} (f_t^\alpha K_t^{1-\alpha})^{1-\varepsilon}$$
$$\text{t.q.} \begin{cases} K_t = K_{-1} \delta^{t+1} + \sum_{\tau=0}^t m_\tau \delta^{t-\tau} \\ F \geq \sum_{t \geq 0} f_t \\ M \geq \sum_{t \geq 0} m_t \end{cases}$$

$f_t, m_t \geq 0$  ,  $M, F, K_{-1}$  donnés.

- Une plus grande recyclabilité  $\delta$  implique de :
  - 1) Conduire plus tôt l'extraction des métaux et la formation d'un capital propre :  $\frac{\partial m_0}{\partial \delta} > 0$
  - 2) Choisir un mix énergétique relativement plus intensif en renouvelables :  $\frac{\partial \frac{K_t}{f_t}}{\partial \delta} > 0$
- Ces résultats restent valables quand on tient compte d'autres facteurs pertinents : le progrès technique, la substituabilité ou la complémentarité entre les ressources, des coûts d'extraction convexes, des dégâts environnementaux des fossiles (extensions à 2 périodes)

## Appendice : Karush-Kuhn-Tucker en horizon infini

Le théorème de Karush-Kuhn-Tucker, qui établit qu'une solution aux conditions du premier ordre d'un Lagrangien convexe est l'optimum sous contraintes, est généralisé pour un nombre infini (dénombrable) de variables.

### Théorème

Soit  $X \subset \mathbb{R}^N$  un sous-ensemble convexe non vide de  $\mathbb{R}^N$  et soit  $x^* \in \text{Int}(X)$ . Soient  $f, g_1, g_2, \dots, g_m : X \rightarrow \mathbb{R}$  des fonctions convexes continues en  $x^*$  et différentiables terme à terme en  $x^*$ . (Condition de qualification) Supposons que pour tout  $k \in \mathbb{N}^*$  et pour tout  $x \in X$ ,  $x^* + P^k(x - x^*) = (x_1, \dots, x_k, x_{k+1}^*, x_{k+2}^*, \dots) \in X$ .

S'il existe  $(\lambda_j^*)_j \in (\mathbb{R}_+)^N$  tels que

$$\lambda_j^* g_j(x^*) = 0, \forall j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

$$f'_{n,x^*}(x_n^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_j^* g'_{j,n,x^*}(x_n^*) = 0, \forall n \in \mathbb{N} \quad (2)$$

(Condition suffisante) Alors  $x^*$  est une solution optimale sur  $\Gamma := \{x \in X : \forall j \leq m, g_j(x) \leq 0\}$  :

$$f(x^*) = \inf_{x \in \Gamma} f(x)$$

(Condition nécessaire) Par ailleurs, si  $x^*$  est une solution optimale sur  $\Gamma$  et si la condition de Slater  $\text{Int}(\Gamma) \neq \emptyset$  est vérifiée, alors il existe une unique famille  $(\lambda_j^*)_j \in (\mathbb{R}_+)^N$  qui vérifie les conditions (de Karush-Kuhn-Tucker) (1) et (2).

- Montrer que la recyclabilité des métaux favorise la transition énergétique
- Fournir un théorème pour démontrer facilement l'optimalité d'une solution à un programme avec horizon infini

- 1 L'électricité renouvelable est-elle viable ?
- 2 Recyclabilité et échéancier de la transition
- 3 Aversion à la taxe carbone
- 4 Les attitudes des Français sur le climat

## Enquête et données

- 3002 réponses collectées en ligne en février/mars 2019
- Représentatif selon six variables socio-démographiques, durée médiane : 19 min
- Procédures assurant la qualité des données (e.g. exclusion des répondants inattentifs ou trop rapides)

## Enquête et données

- 3002 réponses collectées en ligne en février/mars 2019
- Représentatif selon six variables socio-démographiques, durée médiane : 19 min
- Procédures assurant la qualité des données (e.g. exclusion des répondants inattentifs ou trop rapides)
- Mesure proposée : Taxe avec Dividende
  - ▶ Taxe sur les fossiles : +50€/tCO<sub>2</sub>
  - ▶ +13% sur le gaz (resp. +15% sur le fioul domestique)
  - ▶ +0.11€/L sur l'essence (resp. +0.13€/L sur le diesel)
  - ▶ Revenus prélevés sur les ménages redistribués : 110€/an par adulte
  - ▶ Incidence de la taxe : supportée à 80% par les consommateurs
  - ▶ Élasticités : -0.4 pour le transport, -0.2 pour le logement

## Enquête et données

- 3002 réponses collectées en ligne en février/mars 2019
- Représentatif selon six variables socio-démographiques, durée médiane : 19 min
- Procédures assurant la qualité des données (e.g. exclusion des répondants inattentifs ou trop rapides)
- Mesure proposée : Taxe avec Dividende
  - ▶ Taxe sur les fossiles : +50€/tCO<sub>2</sub>
  - ▶ +13% sur le gaz (resp. +15% sur le fioul domestique)
  - ▶ +0.11€/L sur l'essence (resp. +0.13€/L sur le diesel)
  - ▶ Revenus prélevés sur les ménages redistribués : 110€/an par adulte
  - ▶ Incidence de la taxe : supportée à 80% par les consommateurs
  - ▶ Élasticités : -0.4 pour le transport, -0.2 pour le logement
- Pensez-vous qu'une telle mesure permettrait de réduire la pollution et de lutter contre le changement climatique ?
  - ▶ "Les scientifiques s'accordent à dire qu'une taxe carbone serait efficace pour diminuer la pollution" affiché aléatoirement ou non
- Seriez-vous gagnant, perdant, ou non affecté par la réforme ?
- Perte (ou gain) attendue parmi 6 (ou 5) intervalles ?

## Enquête et données

- 3002 réponses collectées en ligne en février/mars 2019
- Représentatif selon six variables socio-démographiques, durée médiane : 19 min
- Procédures assurant la qualité des données (e.g. exclusion des répondants inattentifs ou trop rapides)
- Mesure proposée : Taxe avec Dividende
  - ▶ Taxe sur les fossiles : +50€/tCO<sub>2</sub>
  - ▶ +13% sur le gaz (resp. +15% sur le fioul domestique)
  - ▶ +0.11€/L sur l'essence (resp. +0.13€/L sur le diesel)
  - ▶ Revenus prélevés sur les ménages redistribués : 110€/an par adulte
  - ▶ Incidence de la taxe : supportée à 80% par les consommateurs
  - ▶ Élasticités : -0.4 pour le transport, -0.2 pour le logement
- Pensez-vous qu'une telle mesure permettrait de réduire la pollution et de lutter contre le changement climatique ?
  - ▶ "Les scientifiques s'accordent à dire qu'une taxe carbone serait efficace pour diminuer la pollution" affiché aléatoirement ou non
- Seriez-vous gagnant, perdant, ou non affecté par la réforme ?
- Perte (ou gain) attendue parmi 6 (ou 5) intervalles ?
- Approuveriez-vous une telle mesure ?
  - ▶ 10% 'Oui' : approbation
  - ▶ 19% 'NSP' (Ne sait pas, ne se prononce pas) : acceptation
  - ▶ 70% 'Non' : désapprobation

## Croyances pessimistes

Densité des gains nets à la Taxe avec Dividende **objectifs** vs. **subjectifs** (en € par an par unité de consommation).

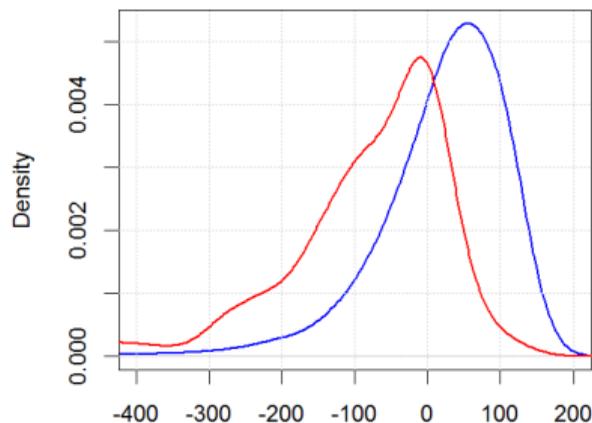


FIGURE – Gain net. Moyenne : -89/+24

- Objectivement, 70% estimés gagnants, mais seulement 14% le pensent
  - ▶ Les Gilets jaunes et ceux qui rejettent la réforme sont plus biaisés

## Croyances pessimistes

Densité des gains nets à la Taxe avec Dividende **objectifs** vs. **subjectifs** (en € par an par unité de consommation).

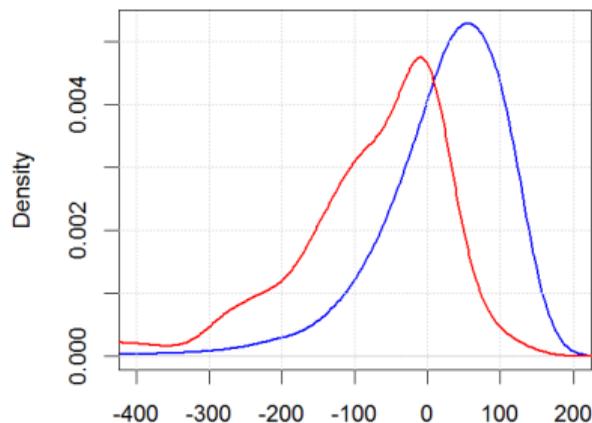


FIGURE – Gain net. Moyenne : **-89/+24**

- Objectivement, **70% estimés gagnants**, mais seulement **14% le pensent**
  - ▶ Les Gilets jaunes et ceux qui rejettent la réforme sont plus biaisés
- 66% trouvent la réforme inefficace pour réduire la pollution ou lutter contre le changement climatique
- 60% pensent que la réforme ne bénéficierait pas aux ménages les plus modestes

## Comment les attitudes influencent les croyances

### Intérêt personnel :

- ① Les perdants révisent correctement (en moyenne) : 86% s'alignent sur notre feedback
- ② Les gagnants ne révisent pas assez : seuls 25% s'alignent

# Comment les attitudes influencent les croyances

## Intérêt personnel :

- ❶ Les perdants révisent correctement (en moyenne) : 86% s'alignent sur notre feedback
- ❷ Les gagnants ne révisent pas assez : seuls 25% s'alignent

## Possible interprétations :

- Les répondants pensent que nous sommes biaisés (vers l'optimisme)
- Les répondants ne font pas confiance au gouvernement pour verser le dividende
- Les répondants sont incertains et averses à la perte : reportent une estimation prudente (plus basse que l'espérance)

# Comment les attitudes influencent les croyances

## Intérêt personnel :

- 1 Les perdants révisent correctement (en moyenne) : 86% s'alignent sur notre feedback
- 2 Les gagnants ne révisent pas assez : seuls 25% s'alignent

## Possible interprétations :

- Les répondants pensent que nous sommes biaisés (vers l'optimisme)
- Les répondants ne font pas confiance au gouvernement pour verser le dividende
- Les répondants sont incertains et averses à la perte : reportent une estimation prudente (plus basse que l'espérance)

## Raisonnement motivé :

Ceux qui rejettent initialement la réforme (et les Gilets jaunes) révisent moins correctement

# Comment les attitudes influencent les croyances

## Intérêt personnel :

- 1 Les perdants révisent correctement (en moyenne) : 86% s'alignent sur notre feedback
- 2 Les gagnants ne révisent pas assez : seuls 25% s'alignent

## Possible interprétations :

- Les répondants pensent que nous sommes biaisés (vers l'optimisme)
- Les répondants ne font pas confiance au gouvernement pour verser le dividende
- Les répondants sont incertains et averses à la perte : reportent une estimation prudente (plus basse que l'espérance)

## Raisonnement motivé :

Ceux qui rejettent initialement la réforme (et les Gilets jaunes) révisent moins correctement

## Efficacité environnementale : effet limité mais significatif de l'amorce

# Comment les attitudes influencent les croyances

## Intérêt personnel :

- 1 Les perdants révisent correctement (en moyenne) : 86% s'alignent sur notre feedback
- 2 Les gagnants ne révisent pas assez : seuls 25% s'alignent

## Possible interprétations :

- Les répondants pensent que nous sommes biaisés (vers l'optimisme)
- Les répondants ne font pas confiance au gouvernement pour verser le dividende
- Les répondants sont incertains et averses à la perte : reportent une estimation prudente (plus basse que l'espérance)

## Raisonnement motivé :

Ceux qui rejettent initialement la réforme (et les Gilets jaunes) révisent moins correctement

**Efficacité environnementale** : effet limité mais significatif de l'amorce

**Progressivité** : notre explication ne convainc personne

## Comment les croyances déterminent les attitudes

Effets des motifs sur l'acceptation de la Taxe avec Dividende :

- +50 p.p. environ pour l'intérêt personnel (IV : effet causal)
- +50 p.p. pour l'efficacité environnementale (IV : effet causal)
- +27 p.p. pour la progressivité (OLS : effet non causal)
- indices de complémentarité entre les motifs : 90% d'approbation parmi ceux croyants aux 3

## Comment les croyances déterminent les attitudes

Effets des motifs sur l'acceptation de la Taxe avec Dividende :

- +50 p.p. environ pour l'intérêt personnel (IV : effet causal)
- +50 p.p. pour l'efficacité environnementale (IV : effet causal)
- +27 p.p. pour la progressivité (OLS : effet non causal)
- indices de complémentarité entre les motifs : 90% d'approbation parmi ceux croyants aux 3

⇒ Le rejet de la taxe carbone s'explique entièrement par des croyances pessimistes, pas par un désintérêt intrinsèque pour le changement climatique ou la tarification pigouvienne.

## Comment les croyances déterminent les attitudes

Effets des motifs sur l'acceptation de la Taxe avec Dividende :

- +50 p.p. environ pour l'intérêt personnel (IV : effet causal)
- +50 p.p. pour l'efficacité environnementale (IV : effet causal)
- +27 p.p. pour la progressivité (OLS : effet non causal)
- indices de complémentarité entre les motifs : 90% d'approbation parmi ceux croyants aux 3

⇒ Le rejet de la taxe carbone s'explique entièrement par des croyances pessimistes, pas par un désintérêt intrinsèque pour le changement climatique ou la tarification pigouvienne.

La causalité de ces effets est démontrée par la méthode des variables instrumentales, en utilisant la variation exogène dans le feedback (autour de 0 gain net) ou l'éligibilité (à des variantes de la Taxe avec Dividendes Ciblés) pour instrumenter la croyance de gain ; ainsi que les amorces sur le changement climatique et l'efficacité environnementale pour instrumenter la croyance en l'efficacité.

ATE (bien identifiés) légèrement inférieurs aux LATE (~40 p.p.) à cause de la spécificité des compliants, confirment l'ordre de grandeur des LATE.

- Documenter le rejet de la taxe carbone dans le contexte des Gilets jaunes, et montrer qu'il est dû à des croyances pessimistes
- Comprendre comment se forment les croyances politiques (en partie par raisonnement motivé), et comment elles affectent les positions politiques
- Estimer les biais de perceptions concernant la taxe carbone, notamment en calculant les gains à la réforme de chaque répondant
- Estimer les effets causaux des motifs d'acceptation d'une taxe carbone, notamment grâce à une méthode originale (fuzzy RDD)
- Fournir une définition exploitable de l'aversion à l'impôt

- 1 L'électricité renouvelable est-elle viable ?
- 2 Recyclabilité et échéancier de la transition
- 3 Aversion à la taxe carbone
- 4 Les attitudes des Français sur le climat

## Connaissances du changement climatique

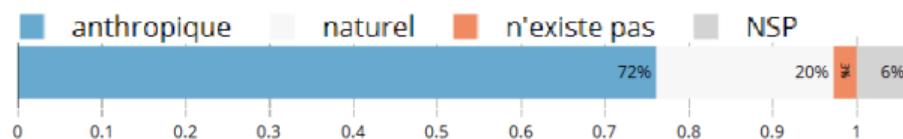


FIGURE – Cause perçue du changement climatique.

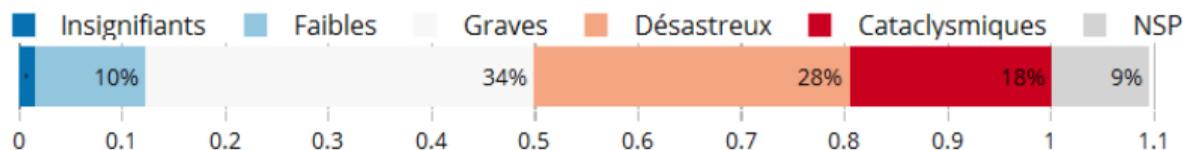


FIGURE – Gravité perçue du changement climatique.

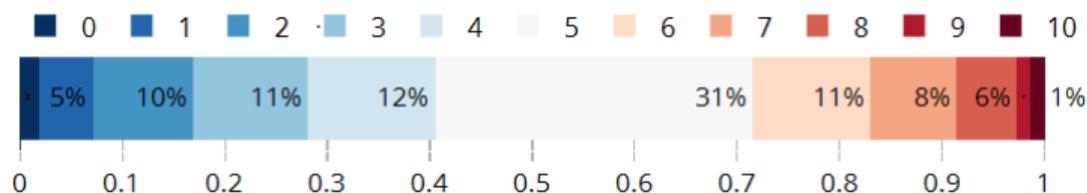
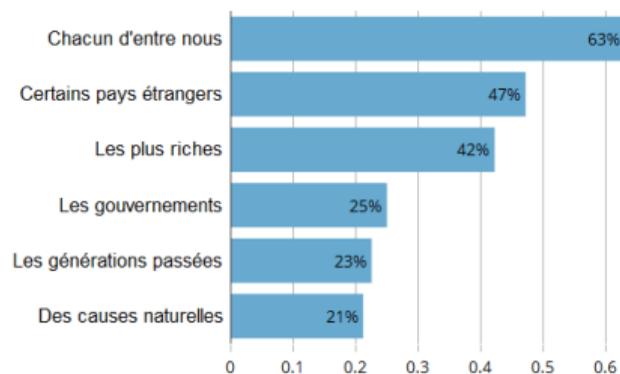


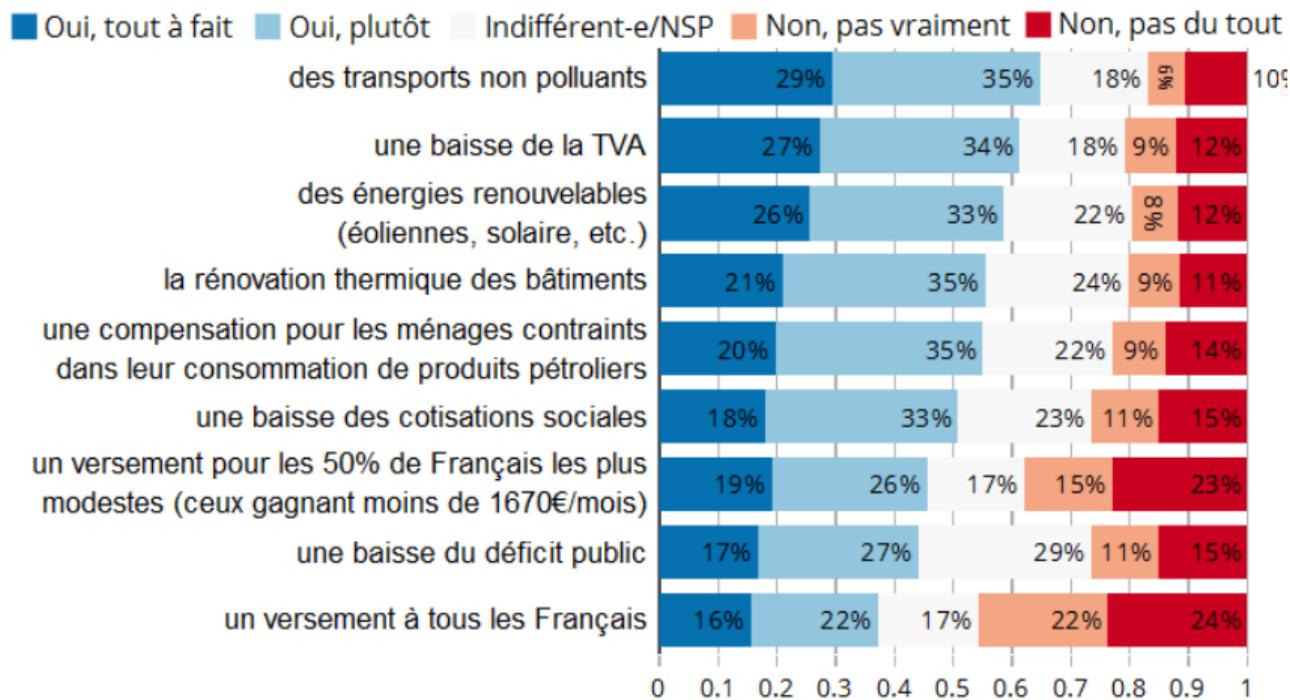
FIGURE – Perceptions des émissions de GES p.c. requises en 2050 pour contenir le réchauffement à +2°C (en tCO<sub>2</sub>eq/an), sachant la valeur actuelle : 10.

FIGURE – Entités perçues responsables du changement climatique.



- 65% sont « prêt à adopter un mode de vie écologique (i.e. manger peu de viande rouge et ne presque pas utiliser d'essence, de diesel ou de kérosène) », « dans l'hypothèse où tous les États du monde luttent fermement contre le changement climatique, notamment en effectuant une transition vers les énergies renouvelables, en mettant à contribution les plus riches, et en imaginant que la France étende très largement l'offre de transports non polluants » (17% "Non")
- 82% seraient prêts à changer leur mode de vie sous une des conditions suivantes : des moyens financiers suffisants, une politique qui va dans ce sens, tout le monde qui en fait autant (environ 45% chacune)

FIGURE – Je serais favorable à la taxe carbone si les recettes étaient utilisées pour financer ...



## Déterminants des attitudes

- Les attitudes sont plutôt idiosyncratiques (les variables socio-démographiques expliquent une faible part de la variance)
- Les 18-25 ans et les diplômés sont un peu plus préoccupés (i.e. connaissent et s'inquiètent)

## Déterminants des attitudes

- Les attitudes sont plutôt idiosyncratiques (les variables socio-démographiques expliquent une faible part de la variance)
  - Les 18-25 ans et les diplômés sont un peu plus préoccupés (i.e. connaissent et s'inquiètent)
  - Il y a une corrélation positive entre connaissances et inquiétude du changement climatique, ainsi qu'entre inquiétude et soutien aux politiques climatiques
  - Ce lien n'est pas perturbé par une polarisation politique des connaissances comme aux États-Unis : le diplôme est associé à la préoccupation, indépendamment de la position politique
- ⇒ Recommandations politiques : campagne d'information massive sur le changement climatique, investissements « verts », taxe sur le kérosène avec dividende, normes.

- Mettre à disposition des données de bonne qualité sur les attitudes climatiques des Français
- Comprendre en quoi et pourquoi certaines mesures climatiques sont préférées à d'autres
- Étayer qu'il serait opportun de renforcer les connaissances du public sur le changement climatique
- Mettre en évidence des mesures climatiques soutenues par une majorité

## Merci pour votre attention et vos remarques !

Un grand merci à Mouez pour son soutien sans faille, ainsi qu'à Olivier pour sa supervision et pour l'accueil à Grenoble.

Merci aux membres du jury, d'avoir accepté cette sollicitation de dernière minute.

Merci enfin à tous mes co-auteurs, sans qui rien n'aurait été possible : Thomas Douenne, Francesco Ricci, Mohammed Bachir...

Thèse et articles sont disponibles en ligne : [sites.google.com/view/adrien-fabre](https://sites.google.com/view/adrien-fabre)

- Ch 1 : [Evolution of EROIs of Electricity Until 2050: Estimation and Implications on Prices](#), *Ecological Economics*, 2019
- Ch 2 : [Mineral Resources for Renewable Energy: Optimal Timing of Energy Production](#), *Resource and Energy Economics*, 2020, avec **Mouez Fodha** et **Francesco Ricci**
- Appendice au Ch 2 : [Finitely Determined Functions and Convex Optimization](#), avec **Mohammed Bachir** et **Sebastián Tapia-García**
- Ch 3 : [Yellow Vests, Pessimistic Beliefs, and Carbon Tax Aversion](#), avec **Thomas Douenne** (*Revise & Resubmit, AEJ : Policy*)
- Ch 4 : [French Attitudes on Climate Change, Carbon Taxation and Other Climate Policies](#), *Ecological Economics*, 2020, avec **Thomas Douenne**

## Ma thèse pour les nuls

- 1 L'électricité renouvelable est-elle soutenable ?  
→ *Oui.*
- 2 Recyclabilité et échéancier de la transition  
→ *Répare ton vélo au lieu d'acheter une moto.*  
    > Appendice : Karush-Kuhn-Tucker en horizon infini  
    → *Vous vous en fichiez, vous aviez raison.*
- 3 Aversion à la taxe carbone  
→ *« La taxe carbone, c'est niet, même s'ils rendent l'argent. »*
- 4 Attitudes des Français sur le climat  
→ *« Mais le Green New Deal, ça ira ! »*

Mais aussi...

- 50h de travail par semaine (dont un bon tiers pour configurer *eduroam*)
- des papiers et des tribunes hors sujet
- 2865 articles collectés, presque autant d'oubliés
- des dizaines de voyag.. euh, de conférences très sérieuses
- une aventure solitaire, mais des amitiés pour la vie ♥