CHANGEMENT CLIMATIQUE ET INNOVATION VERTE

Philippe Aghion

COLLÈGE DE FRANCE
1530

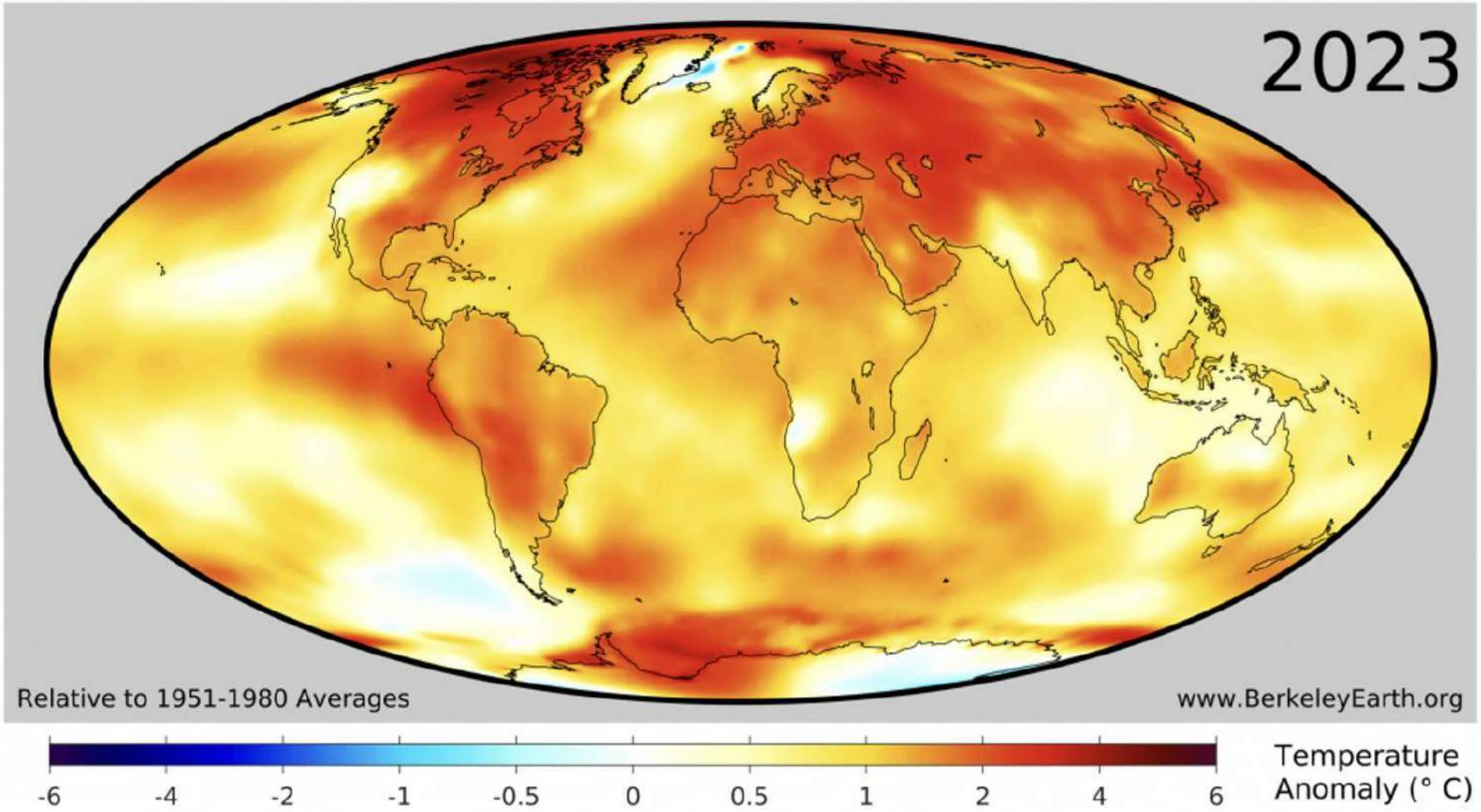
PLAN DU COURS

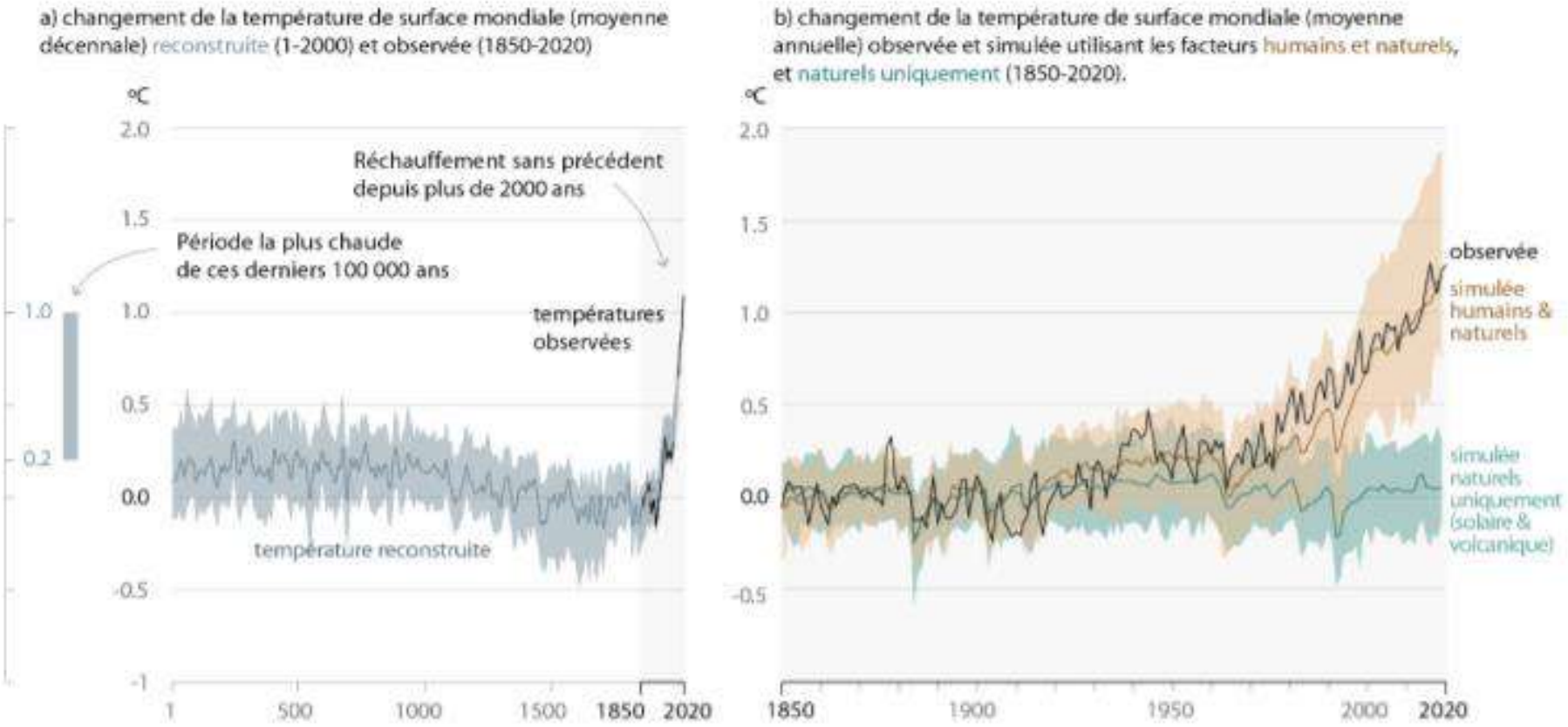
1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE
2. LA TAXE CARBONE
3. L'INNOVATION VERTE
4. LA POLITIQUE INDUSTRIELLE
5. L'ÉCOSYSTÈME DE LA TRANSITION
6. DÉCROISSANCE ENDOGÈNE
7. LA CHAÎNE DE PRODUCTION VERTE

CHANGEMENT CLIMATIQUE

COLLÈGE DE FRANCE
1530

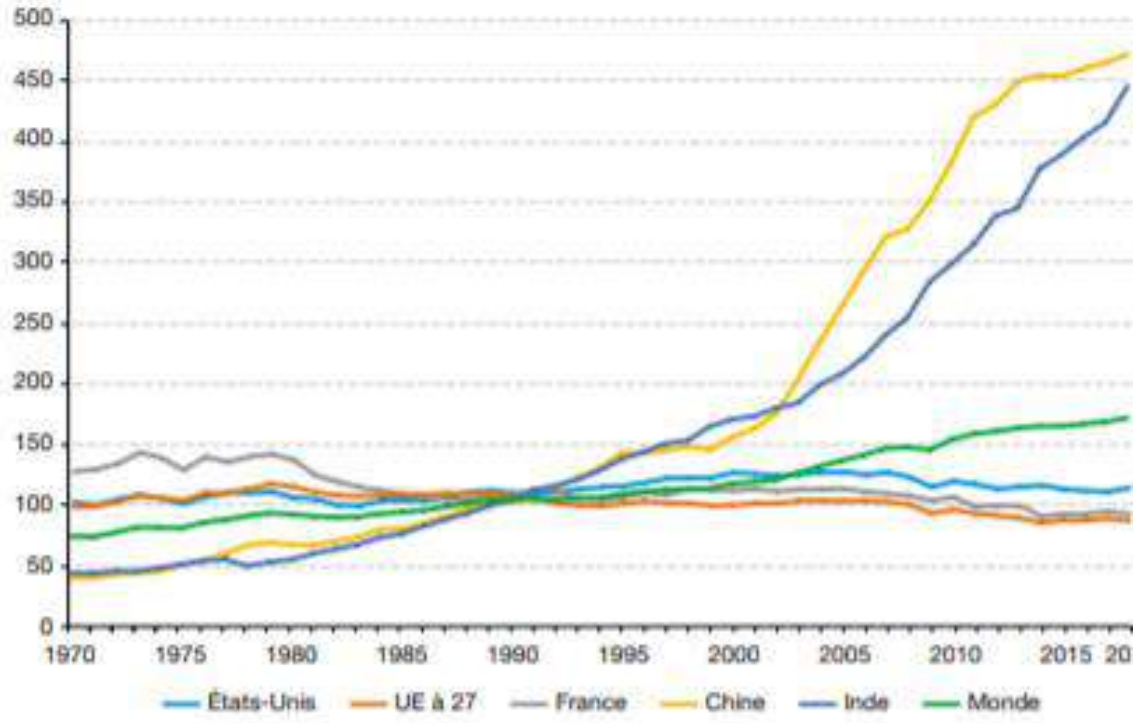
Le réchauffement actuel



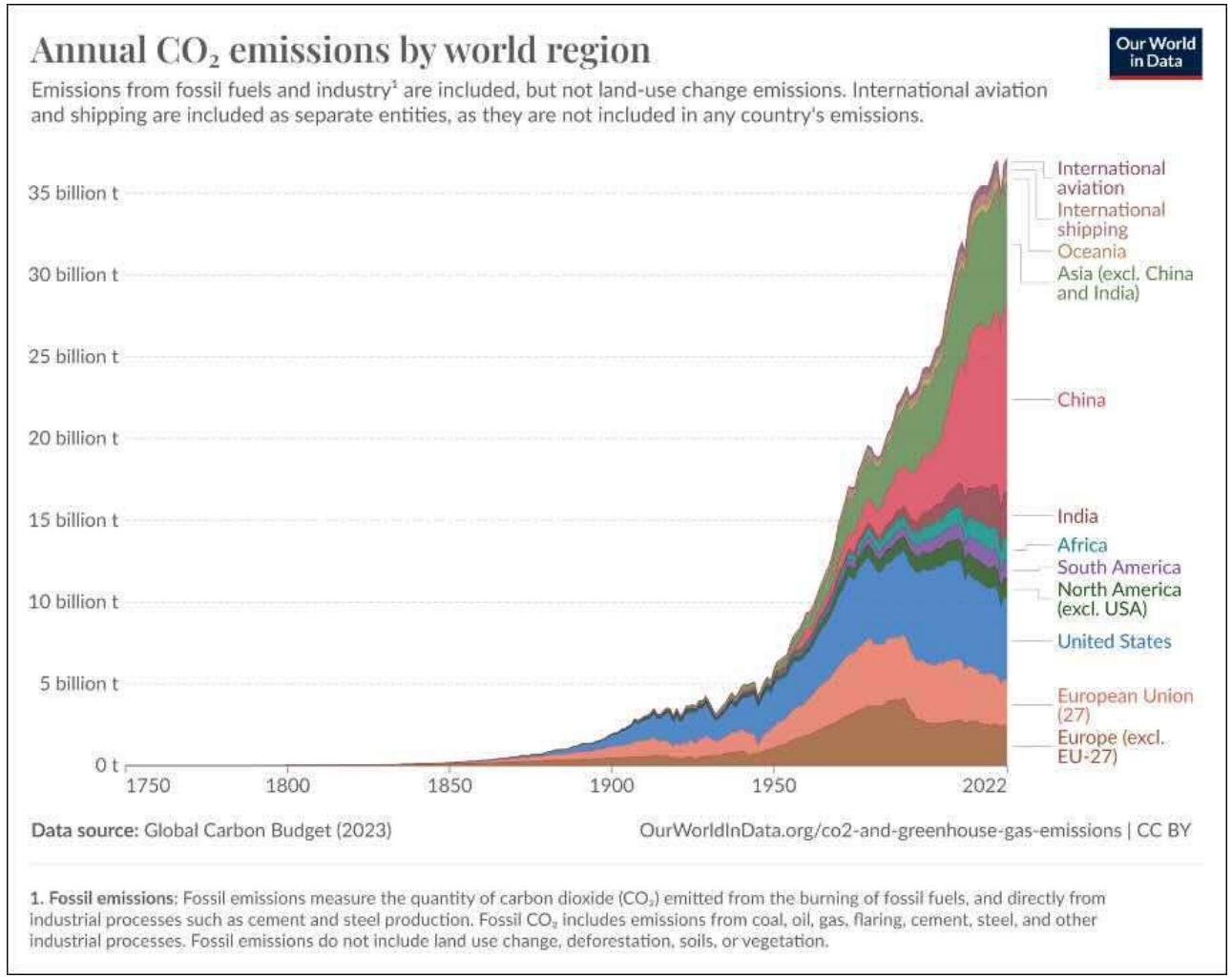


COLLÈGE DE FRANCE
1530

Évolution des émissions de CO2 à travers le monde

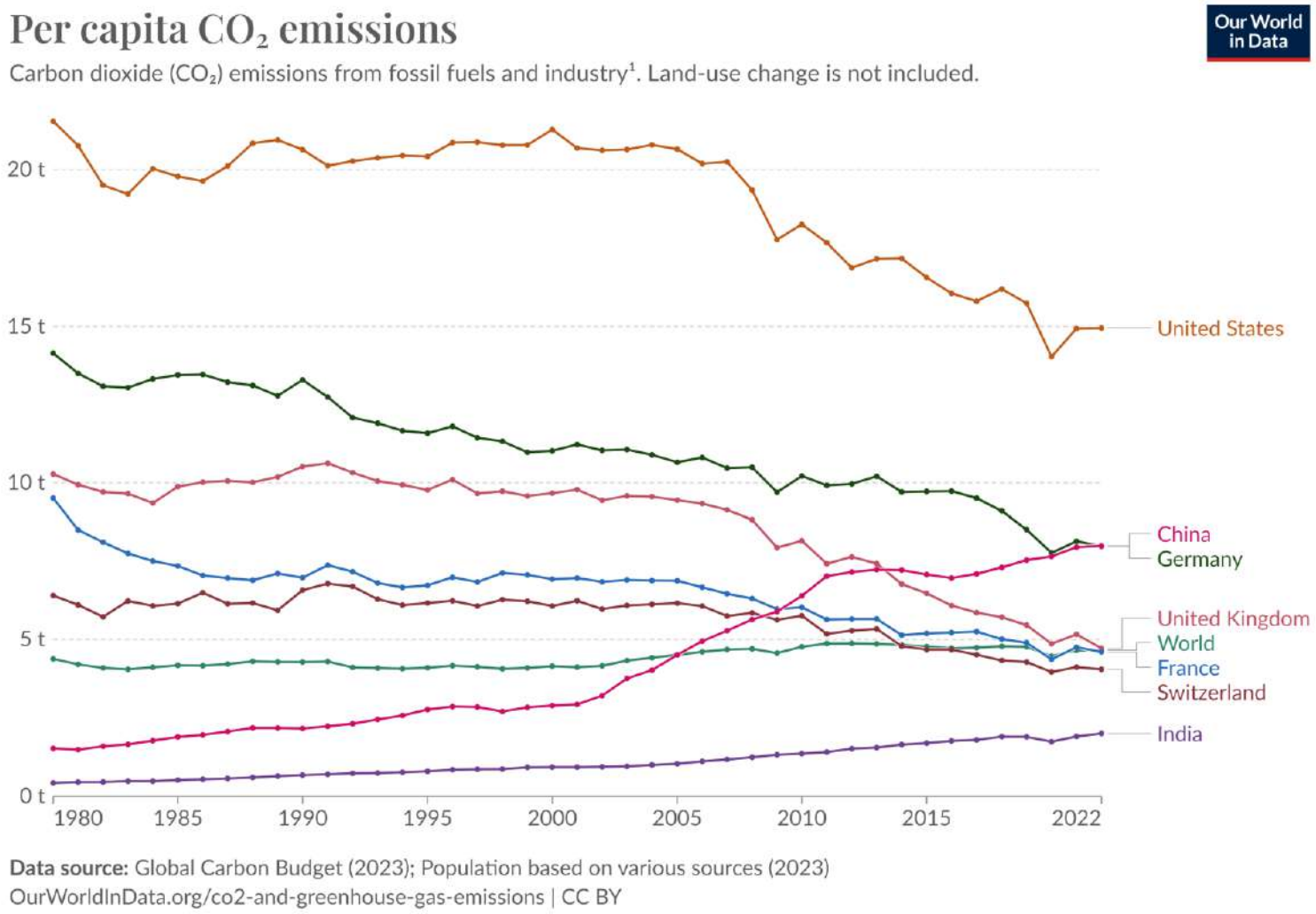


Source : EDGAR, 2019



Évolution des émissions de CO_2 à travers le monde entre 1970 et 2018 – base 100 en 1990

Les émissions par tête varient énormément…



1. **Fossil emissions**: Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO_2) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO_2 includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Le climat en économie

- Nordhaus (1992 Science) : modèle DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy)

- Étudie le lien entre émissions de gaz à effet de serre et activité économique => encore au coeur des débats sur l'effet du changement climatique sur l'(les) économie(s).

- Permet de determiner le coût social du carbone (SCC) et donc la politique climatique optimale à mener

- Nombreux débats sur la bonne paramétrisation du modèle

Le climat

- Deux éléments essentiels : un modèle du climat et une fonction de dommages

- Incertitudes/débats (discount rate, Knight, erreurs possibles)

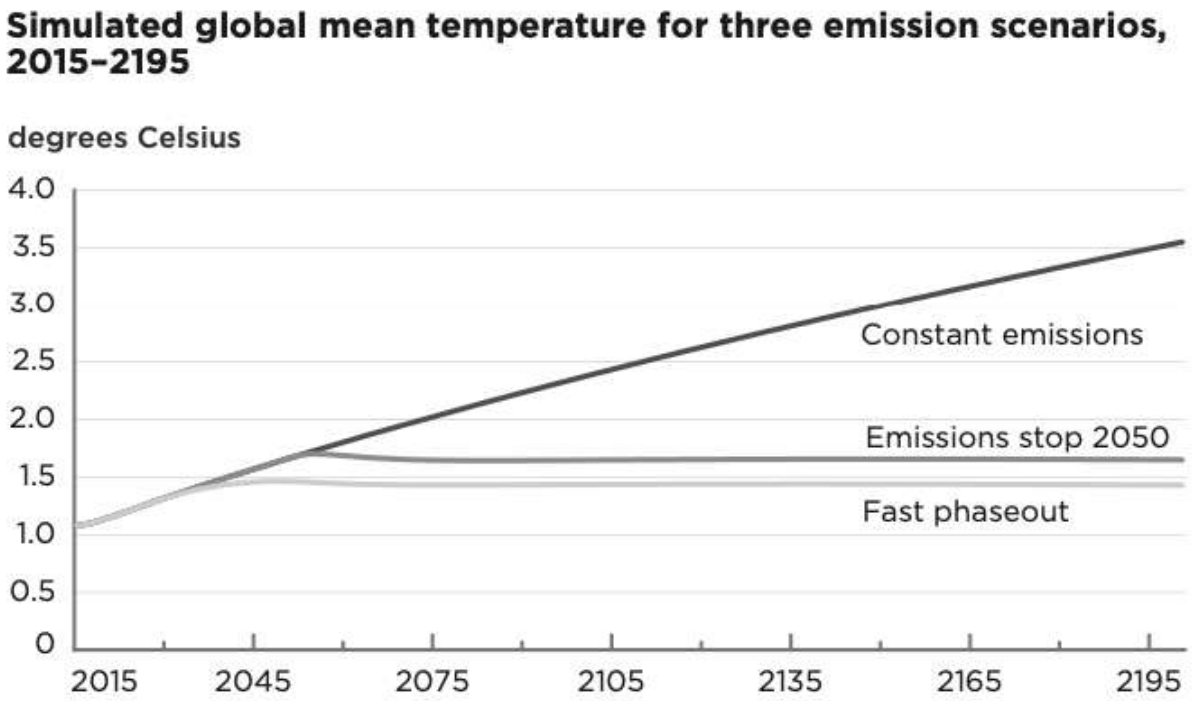
- Un découplage entre croissance du PIB et émissions de CO_2 est possible ? Coûts de la décarbonation

Températures et émissions

- Les économistes utilisent des modèles stylisés pour approximer le lien entre température et émissions.

- Chaque addition de CO_2 à l'atmosphere augmente la temperature globale.

- La temperature à l'équilibre est le résultat du stock d'émissions. Si l'on n'émet plus une seule tonne après 2050, la temperature convergera entre +1,6° et +1,7°

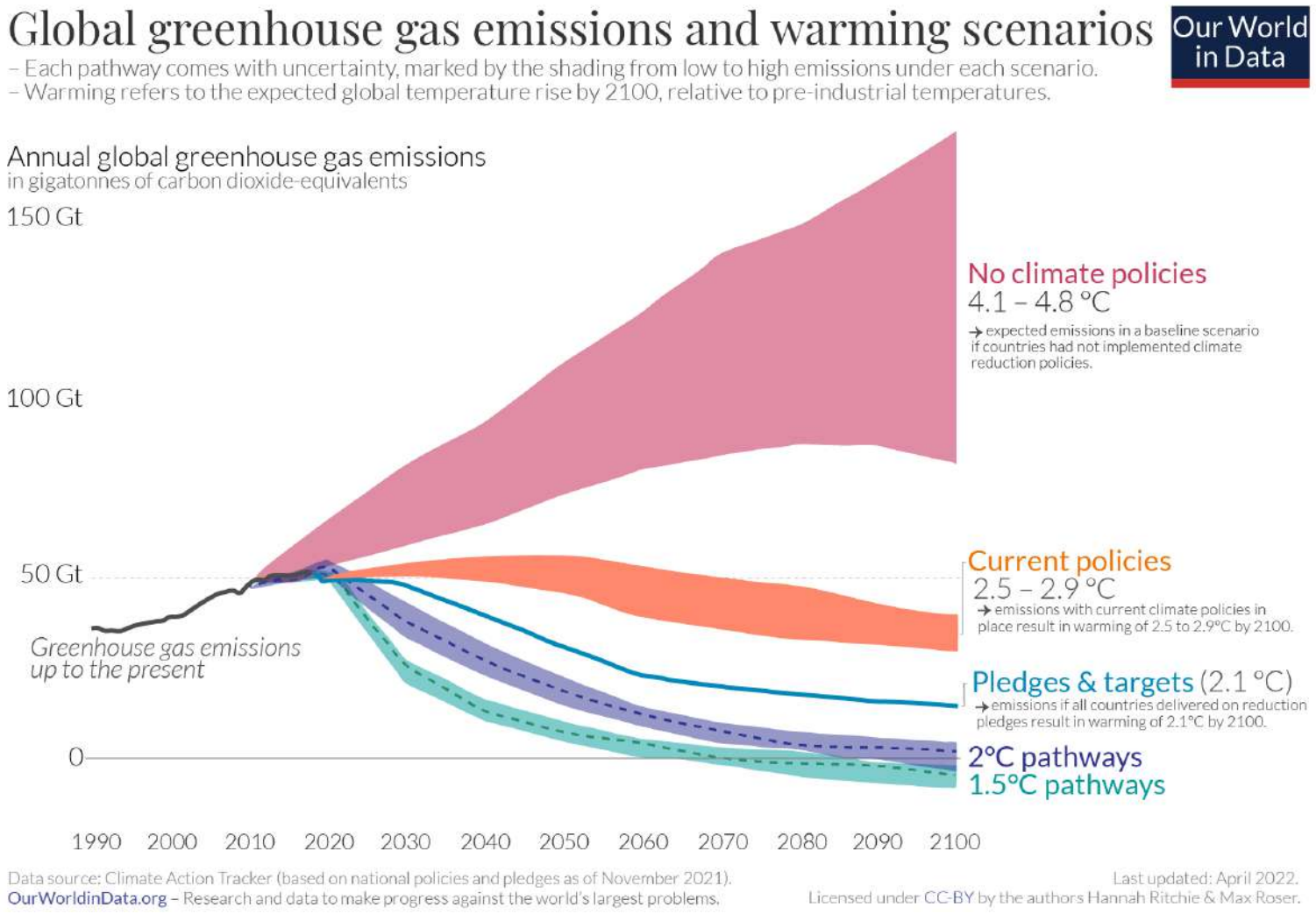


Source : The Green Frontier, calculs des auteurs

Où en sommes nous ?

- Les engagements pris par l'ensemble des nations sont encore insuffisants pour atteindre la cible des 2°.

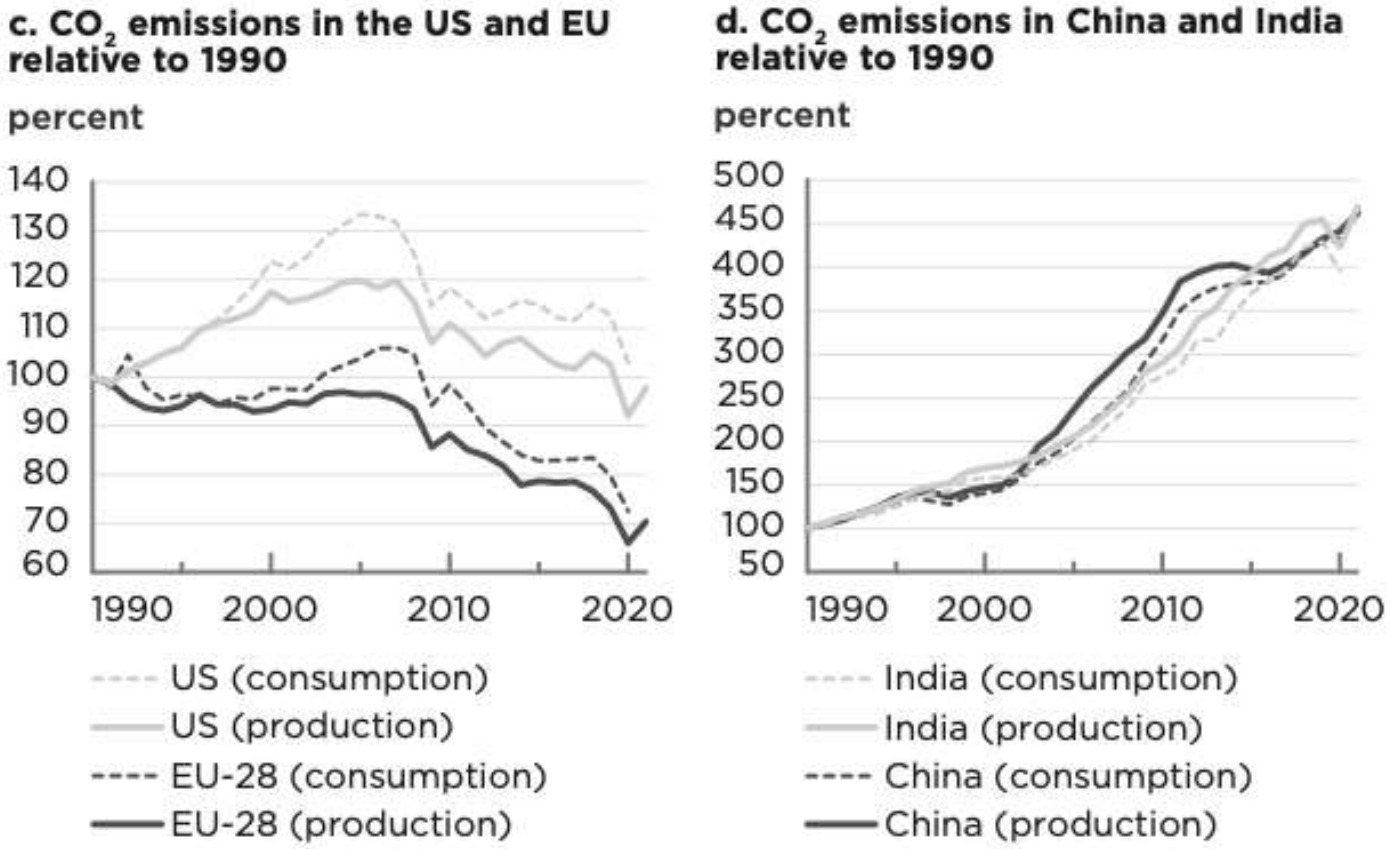
- Les politiques mises en place nous amèneraient à une température entre 2,5 et 2,9° en 2100.



Compter les émissions

- Les émissions totales de CO_2 aux États-Unis et en Europe sont en baisse alors qu'elles sont en hausse en Chine et en Inde.

- Lorsque l'on considère les émissions liées a la consommation (pointillés) qui prennent en compte aussi les imports de CO_2, ce chiffre est aussi en baisse en UE et aux US.



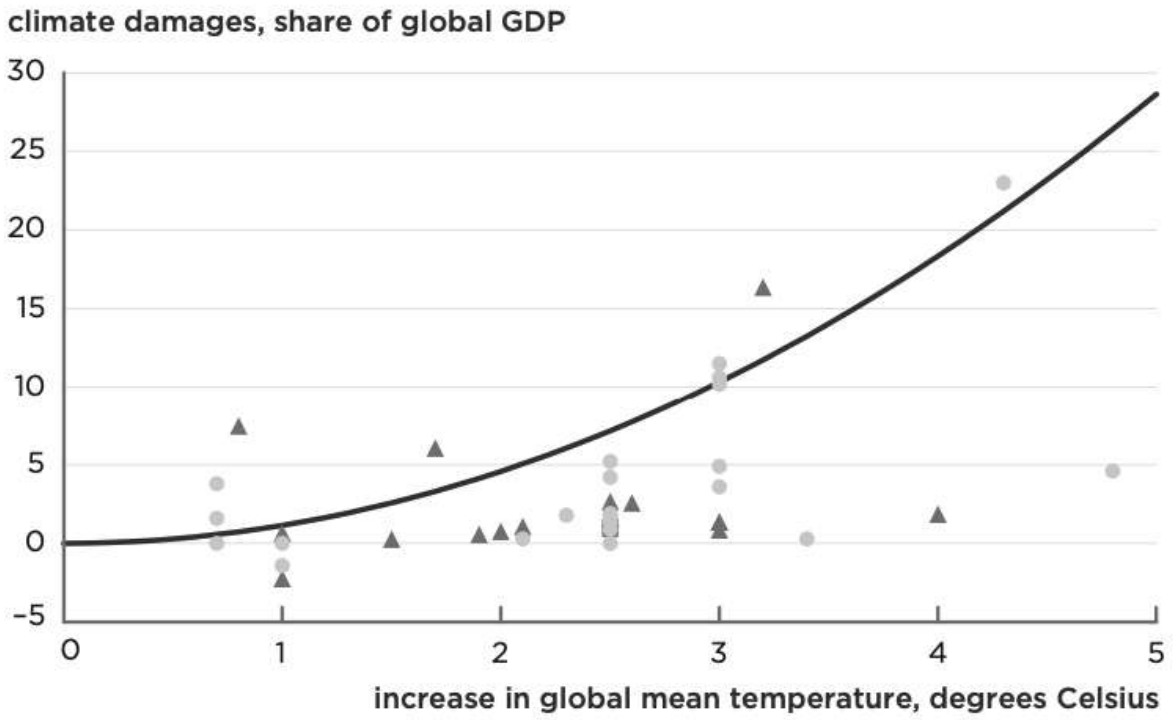
Sources : Our World in Data & World Bank National Accounts & The Green Frontier

Fonction de dommages

- Le graphique représente la relation entre l'augmentation de la température locale et les dommages en pourcentage du PIB.

Figure 2.4

Metastudy of climate damages from increased global mean temperature, share of GDP

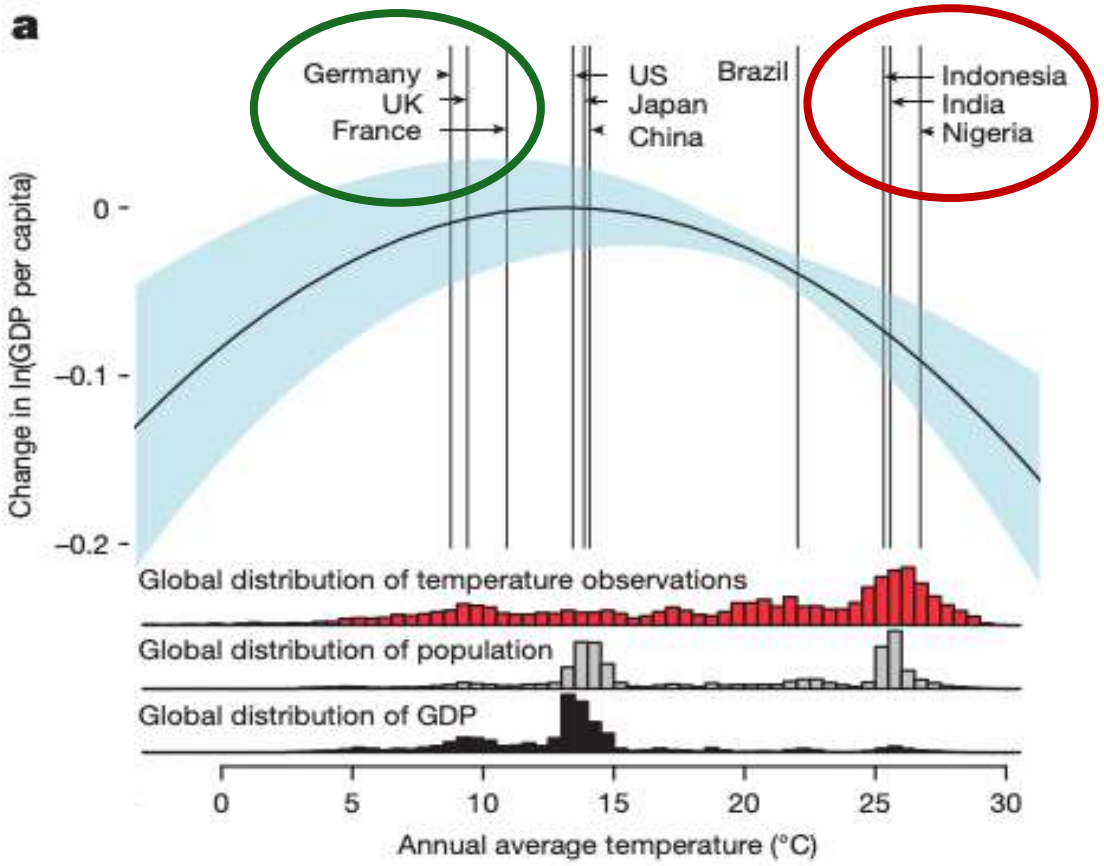


Note: Dots are individual studies and triangles are variations of previous studies that are given less weight in the aggregate relationship depicted by the solid line.

Source: Howard and Sterner (2017).

Hétérogénéité entre pays

- L'impact du changement climatique varie grandement d'une économie à l'autre.
- Certaines économies pourraient gagner du réchauffement climatique
- Au contraire, les pays déjà chauds seraient exposés à un risque bien plus grand.
- Enfin, certaines études montrent que le niveau de richesse joue aussi sur la résilience des économies : les économies développées peuvent mieux s'adapter au changement climatique

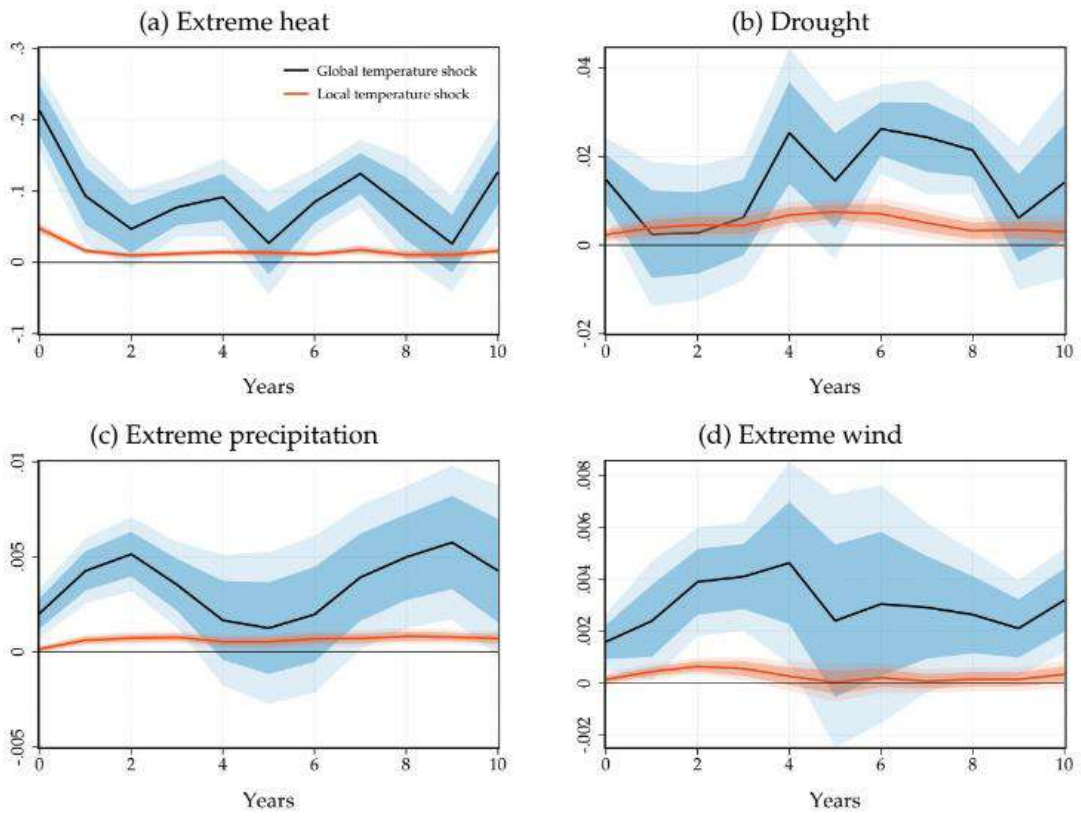


Source : Burke, Hsiang, Miguel (2015)

Variations de température mondiales

- On observe ici l'augmentation de la fréquence d'événements extrêmes lorsque la température *mondiale* augmente de 1° (en bleu).

- Cette réponse est à comparer à celle en rouge qui correspond à l'augmentation de la fréquence de ces événements lorsque la température *locale* augmente de 1°



Source : Bilal, Känzig (2024)

Données de l’équation

- Taux d’actualisation
- Différence entre risque et incertitude (Knight 1921)
- Types d’erreurs

Taux d’actualisation

- Étant donné que les dommages causés par nos émissions d’aujourd’hui seront subis demain, il nous faut une manière de comparer les investissements dans la transition aujourd’hui avec les dégâts du réchauffement climatique dans 10, 20, 100 ans…

- Un euro aujourd’hui n’a pas la même valeur que dans x années à cause de la croissance. La consommation de un euro dans le futur vaut moins que 1€ aujourd’hui.

- Le taux d’actualisation est déterminé par les économistes / décideurs / scientifiques, il n’y a pas de consensus des économistes : Stern 1,4% vs Nordhaus 4%

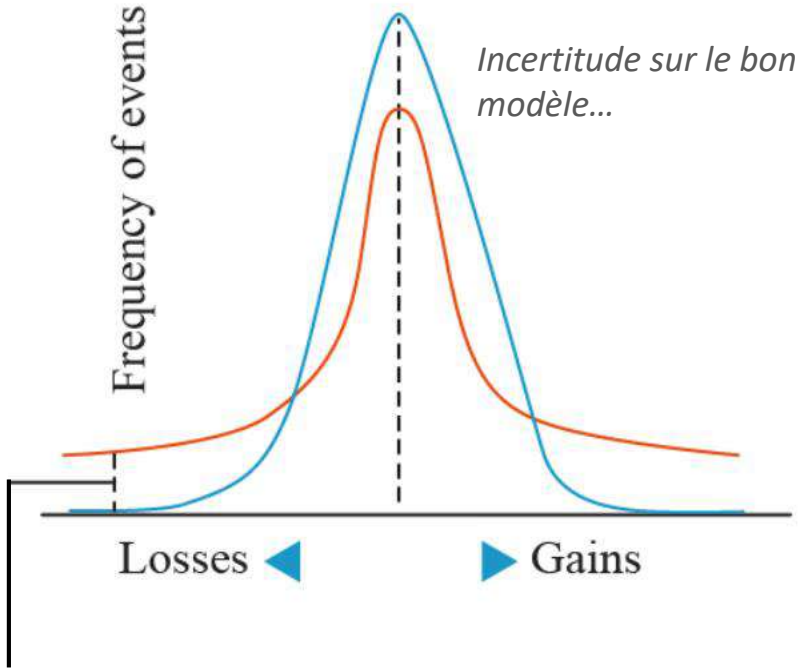
Risque et incertitude

- Knight (1921) : Risk, Uncertainty and Profit

- Différence fondamentale entre le risque et l'incertitude
  - Risque : une probabilité peut être déterminée pour tous les événements possibles (penser au dé à 6 faces)
  - Incertitude : fondamentalement impossible de déterminer la probabilité de chaque événement

- Le réchauffement climatique est un phénomène incertain. Nous avons un modèle empirique pour expliquer le climat, mais celui-ci est fondamentalement incomplet pour établir une distribution des probables.

- Cygnes Noirs => événements catastrophiques



Probabilité de perdre beaucoup

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Types d’erreurs

- Les recommandations des économistes sont extrêmement sensibles au taux d’actualisation et à la fonction de dommages. Si l’on ajoute à cela l’incertitude inhérente au modèle climatique, il existe deux types d’erreurs possibles :
  - Erreur I : espérer le meilleur mais obtenir le pire => une politique peu ambitieuse et des dégâts dans l’extrémité haute de l’intervalle des possibles
  - Erreur II : préparer le pire mais obtenir le meilleur => une politique trop ambitieuse par rapport au risque réalisé du changement climatique

Types d’erreurs

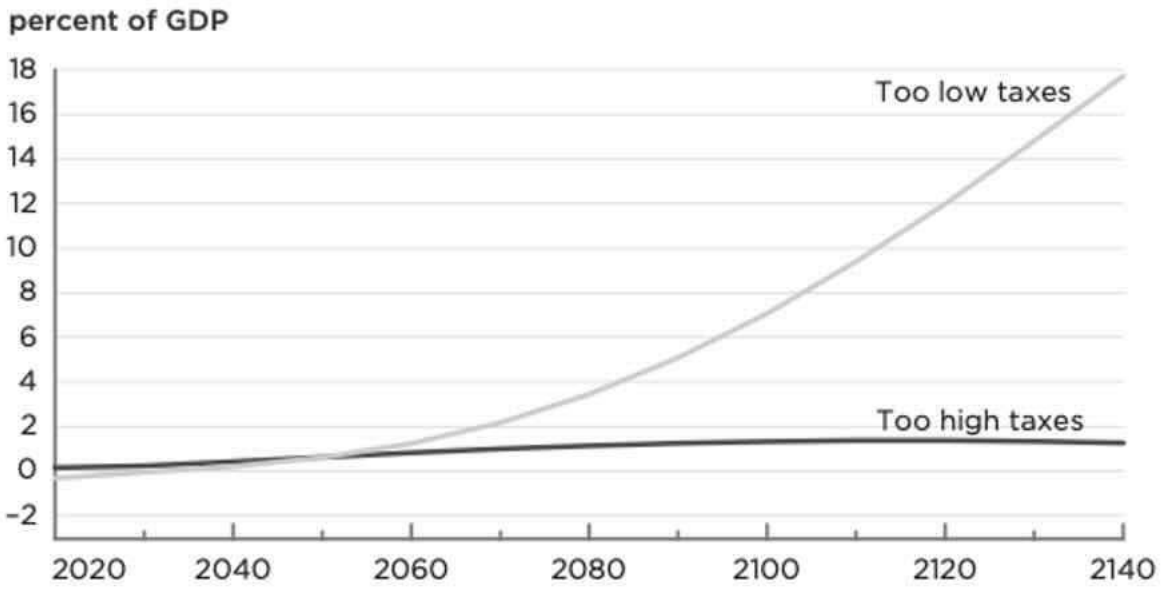
- On modélise ici les coûts des deux types d’erreurs dans le scénario réalisé, par rapport à la politique optimale dans chaque situation.

- Le coût de taxes trop basses dans un monde où le risque climatique est insignifiant est marginal (moins de 2% du PIB max).

- En revanche, le coût de l’inaction dans un monde où le climat est très sensible aux émissions est immense.

Figure 2.11

Global costs of policy mistakes 1 (too low taxes) and 2 (too high taxes), percent of GDP



Source: Authors' calculations.

Coûts de la transition

- Identité de Kaya : quels leviers pour décarboner ?

- Quelques exemples de coûts

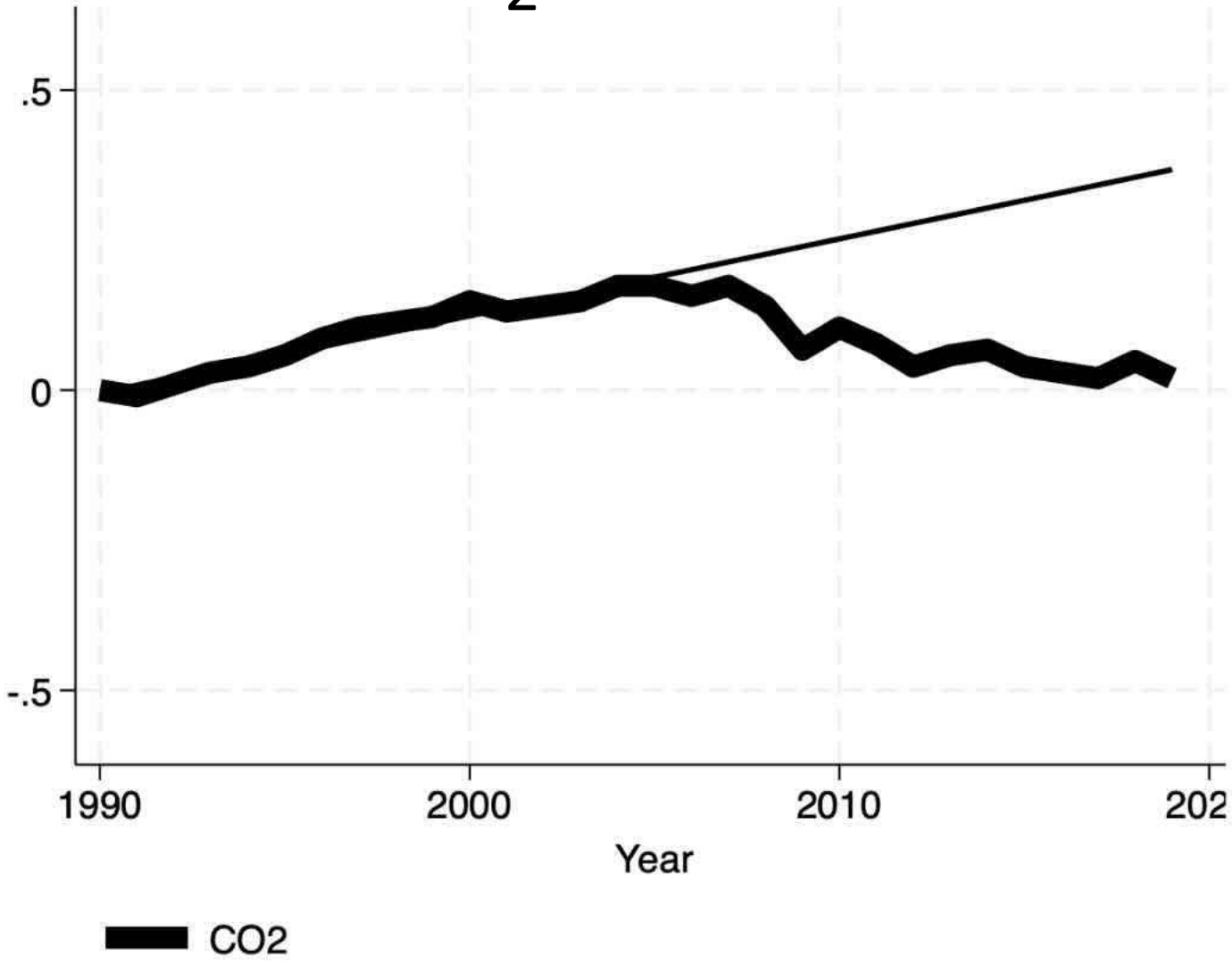
L'identité de Kaya

- On peut décomposer les émissions totales en 4 termes :

$$V_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{\text{Énergie}} \times \frac{\text{Énergie}}{PIB} \times \frac{PIB}{Pop} \times Pop$$

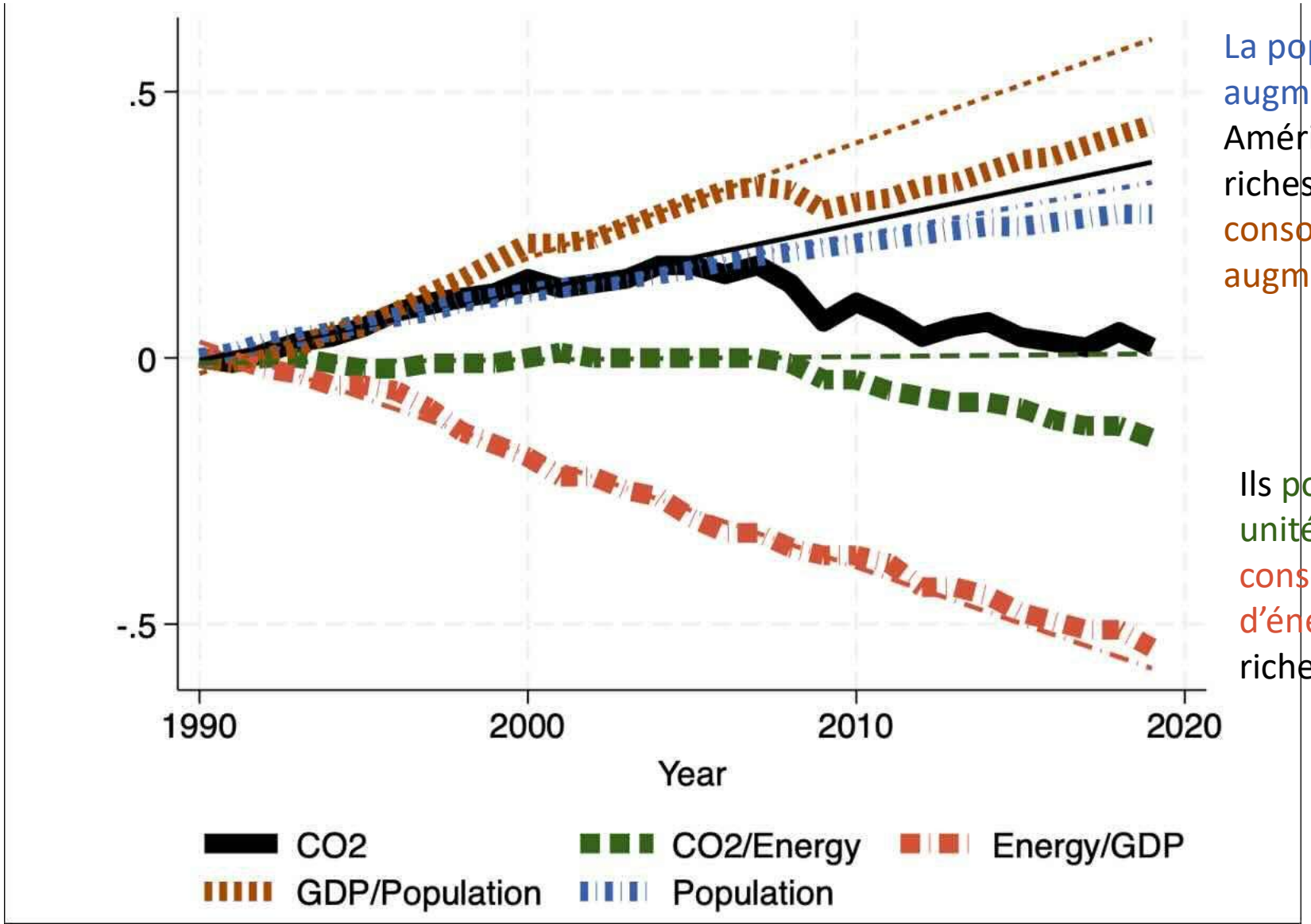
- On peut ainsi mieux comprendre l'augmentation des émissions et identifier les leviers de diminution.

Les émissions de CO_2 aux États-Unis



COLLÈGE DE FRANCE 1530

L'identité de Kaya pour les États-Unis

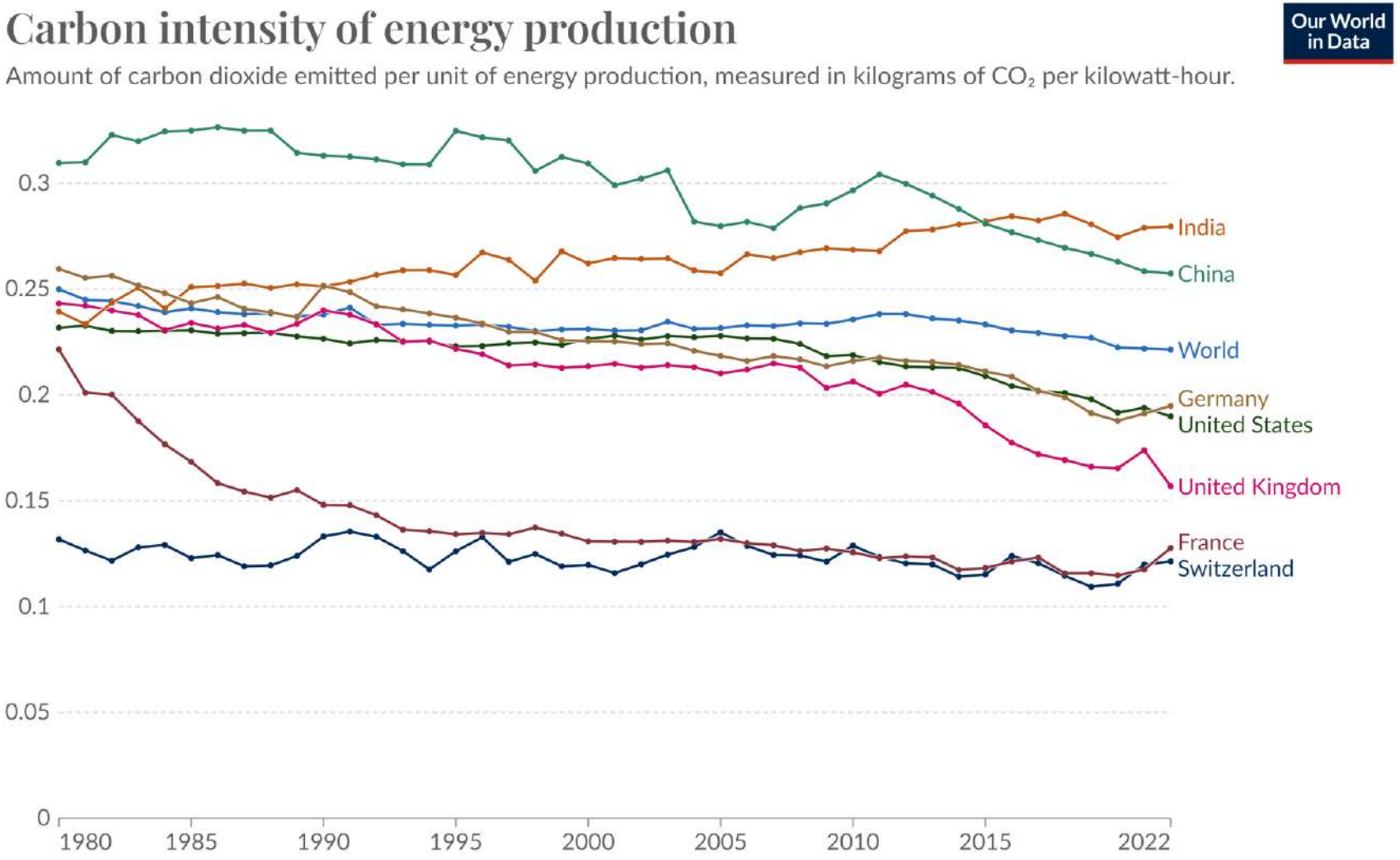


La population américaine augmente et les Américains sont plus riches puisque leur consommation par tête a augmenté.

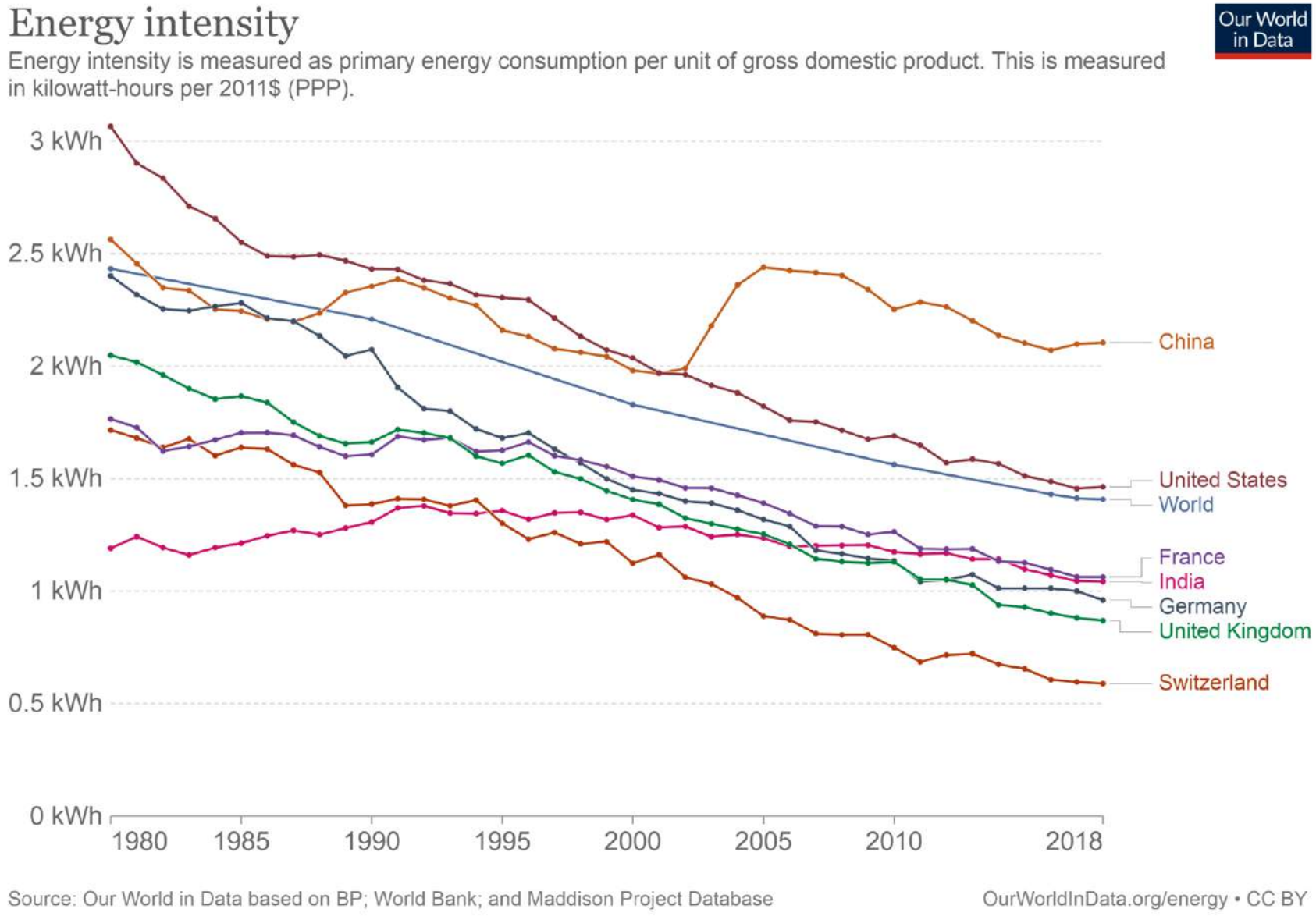
Ils polluent moins par unité d'énergie et consomment moins d'énergie par unité de richesse.

COLLÈGE DE FRANCE 1530

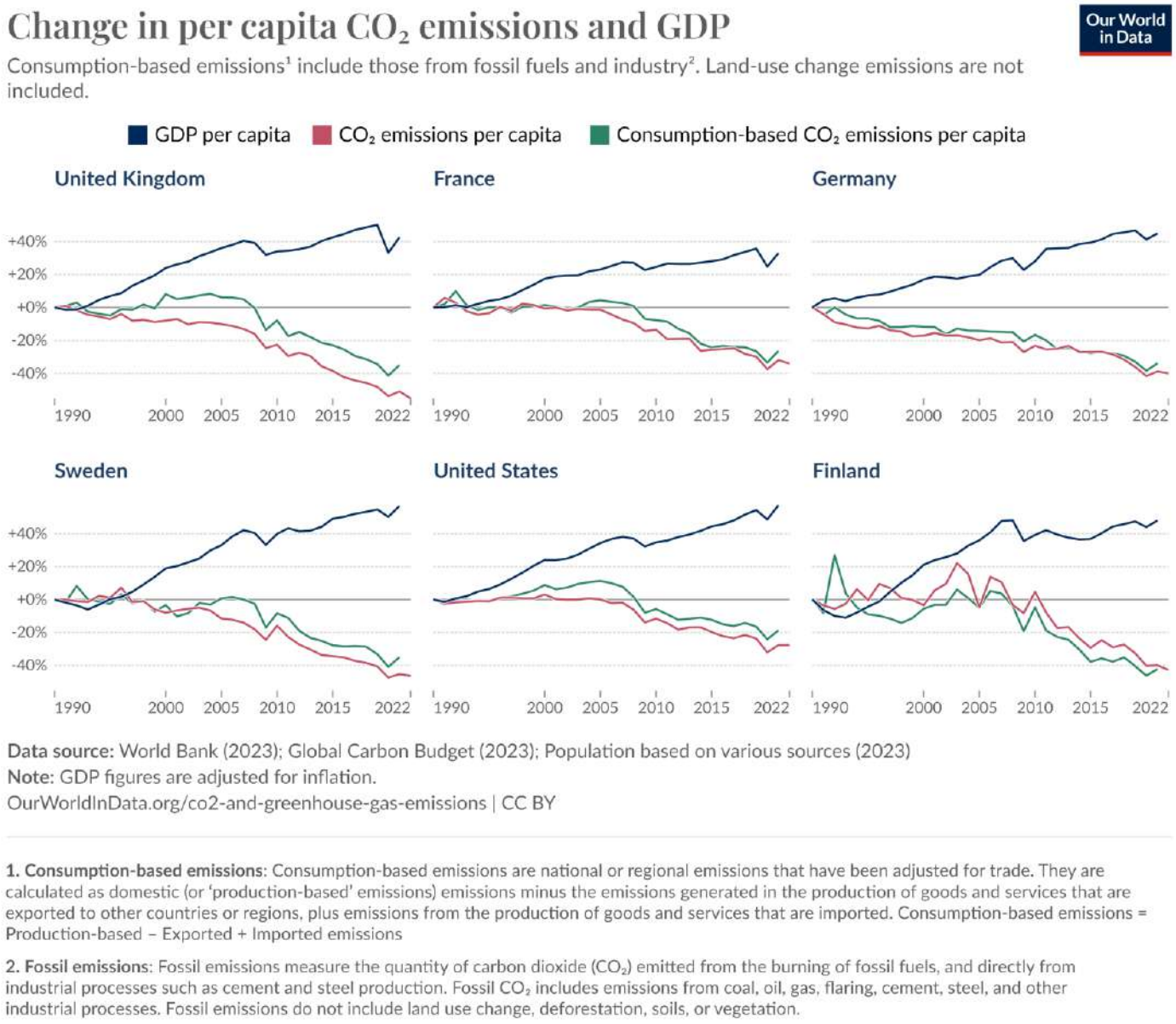
$$\frac{V_{CO_2}}{\text{Énergie}}$$ diminue dans certains pays



$\frac{Énergie}{PIB}$ baisse partout dans le monde



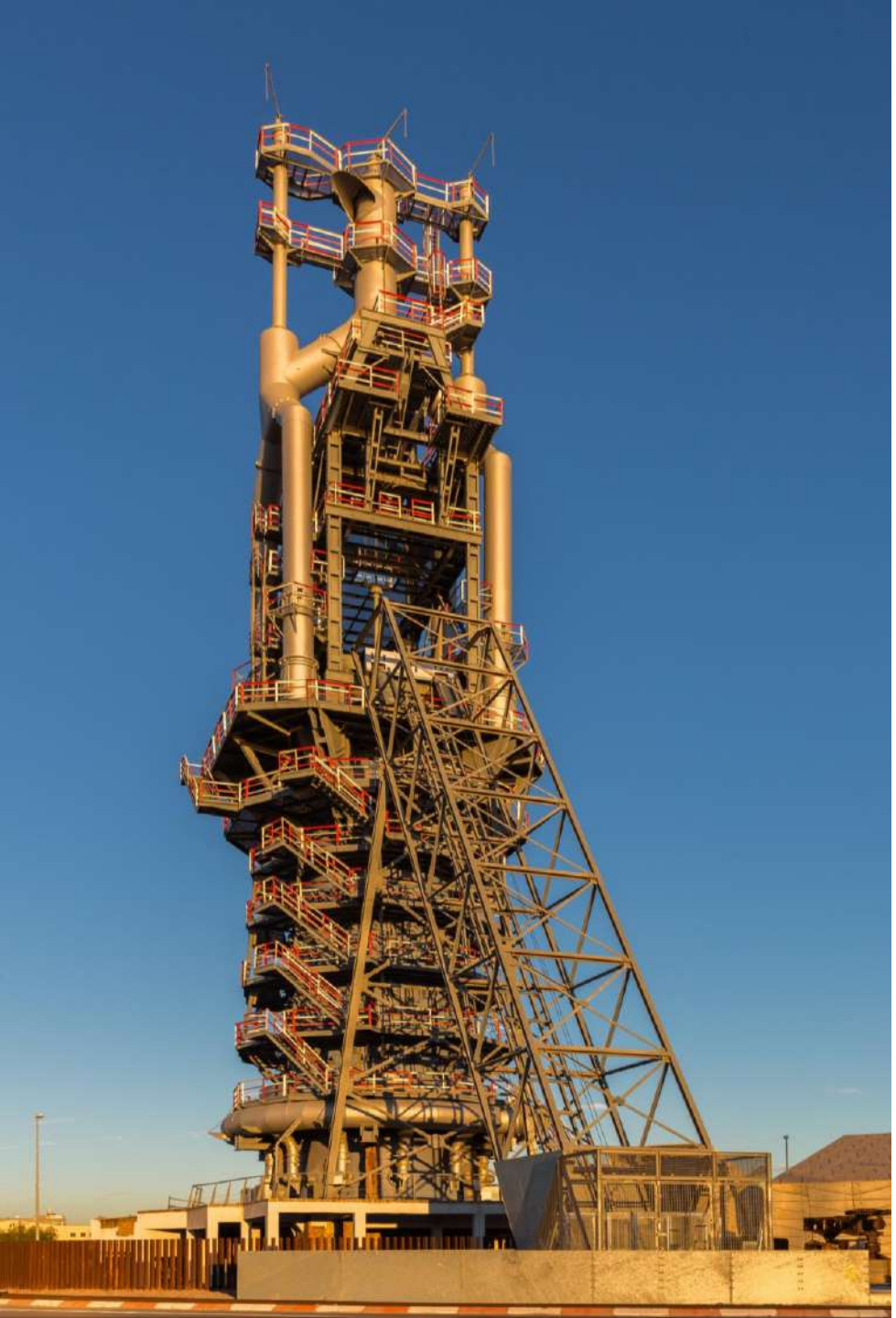
Le découplage entre les émissions de CO_2 et le PIB par tête est possible



1. Consumption-based emissions: Consumption-based emissions are national or regional emissions that have been adjusted for trade. They are calculated as domestic (or 'production-based' emissions) emissions minus the emissions generated in the production of goods and services that are exported to other countries or regions, plus emissions from the production of goods and services that are imported. Consumption-based emissions = Production-based – Exported + Imported emissions

2. Fossil emissions: Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO_2) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO_2 includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

- … ce qui ne veut pas dire qu'il est sans coût !



Quels sont les coûts de la transition ? Le cas de l’acier

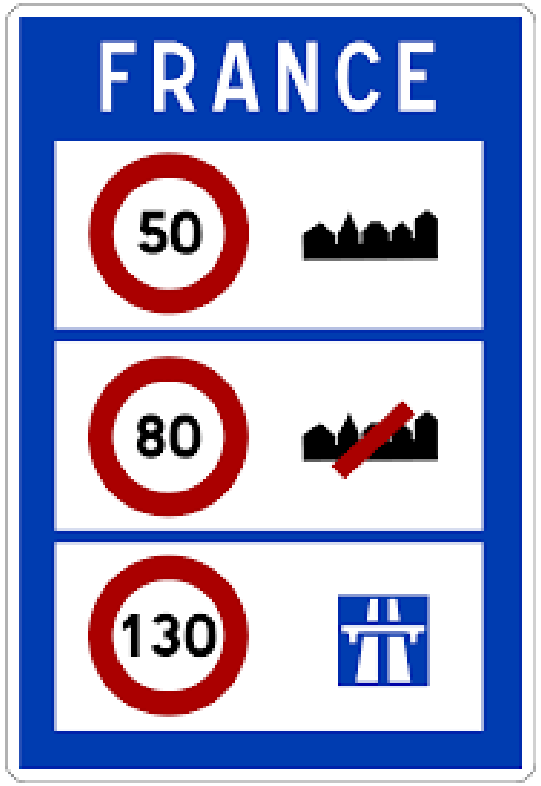
- En utilisant la technologie traditionnelle (haut fourneau), la production d'une tonne d'acier génère 2 tonnes de CO_2.
  - Le coût moyen d'une tonne d'acier en 2022 est d'environ 650 € avec cette technologie.
  - Les technologies zéro émission font augmenter ce coût à 1150 €.
  - Les installer entraînerait un coût par tonne de CO_2 évitée égal à (1150-650)/2=250 €.

- Deux questions :
  - Est-il socialement souhaitable d'interdire le haut fourneau ?
  - Quel est le bénéfice sociétal de cette interdiction ?

Quels sont les coûts de la transition ? Le cas de l’aviation

- En 2050, supposons que :
  - 1 tonne de kérosène coûtera 700 $
  - 1 tonne d'e-kérosène coûtera 3 500 $.
- Nous savons que :
  - 1 tonne de kérosène émet 3,16 tonnes de CO2
  - 1 tonne d'e-kérosène émettra 0,32 tonnes de CO2.
- Remplacer le kérosène par des e-carburants dans l'aviation coûtera (3500-700)/(3,16-0,32)= 986 $/tCO2 en 2050.
- Il existe d'autres SAF (carburants d'aviation durables) à faible teneur en carbone, comme les biocarburants ou les carburants produits à partir de déchets (HEFA), mais leur disponibilité est limitée, et certains d'entre eux sont en concurrence avec d'autres utilisations des terres.

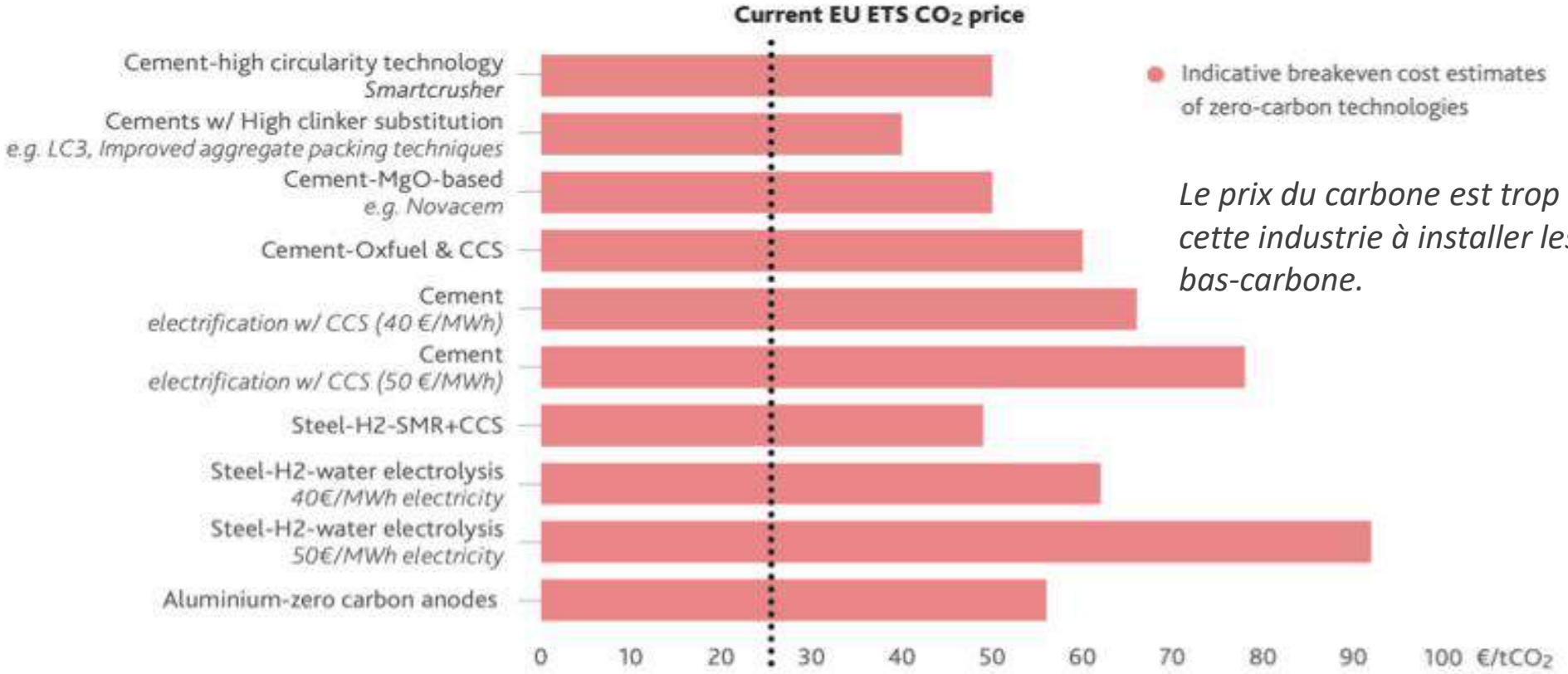
Réduire la limitation de vitesse de 130 à 110 km/h



- Pour 1000 km, la réduction de la vitesse de 130 km/h à 110 km/h a les impacts contradictoires suivants :
  - Temps perdu : 1,4h pour une moyenne de 2,2 passagers = 3,1 heures
  - Économie de carburant : 11,4 litres d'essence
  - Économie de CO_2 : 28,4 kg de CO_2.
- Quelle est la valeur de cet impact ?
  - 1 heure perdue = 17 euros
  - 1 litre d'essence = 0,81 euro (prix de l'essence hors taxes)
- Coût sociétal net de 17x3,1-0,81x11,4 = 43,47€ pour 28,4 kg de CO_2 économisés. Donc le coût par tonne de CO_2 économisée serait égal à 1530€ si la réforme était mise en œuvre.

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Coût par tonne de CO_2 non émise dans l'industrie de la cimenterie et la sidérurgie



Le prix du carbone est trop bas pour inciter cette industrie à installer les technologies bas-carbone.

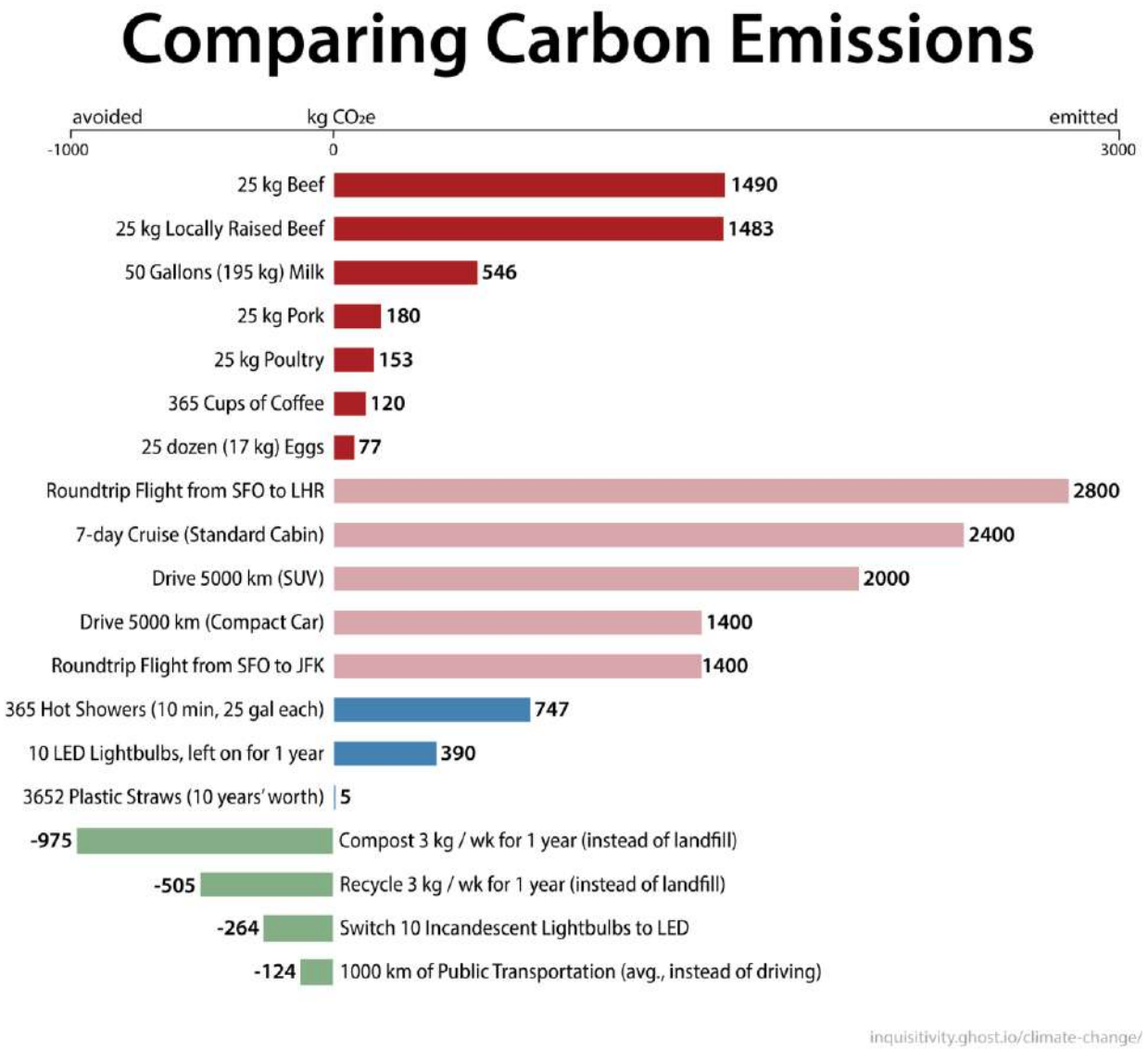
Source : Sartor et Bataille 2019.

Estimation de quelques coûts

Action	Estimation du coût de la réduction
Passer du charbon au gaz dans le mix électrique de l'UE	26 €/tCO2
Passer du fioul domestique à la pompe à chaleur	42 €/tCO2
Installer de nouvelles capacités nucléaires aux États-Unis	100 €/tCO2
Passer du charbon à l'hydrogène pour la production d'acier	235 €/tCO2
Passer à une électricité 100 % éolienne aux États-Unis (+ batteries)	290 €/tCO2
Passer de la voiture thermique à la voiture électrique	305 €/tCO2
Rénovation thermique d'un appartement en France	350 €/tCO2
Passer du kérosène au e-kérosène	986 €/tCO2
Réduire la température ambiante de 1°C	1000 €/tCO2
Passer des tomates espagnoles aux tomates locales à Toulouse	3077 €/tCO2

Actions individuelles

- Les actions individuelles sont aussi nécessaires pour réduire les émissions.
- On observe ici les émissions relatives à certains biens et aliments
- Quel effort personnel représente la réduction de chacune de ces consommations ?



PLAN DU COURS

1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE
2. LA TAXE CARBONE
3. L'INNOVATION VERTE
4. LA POLITIQUE INDUSTRIELLE
5. L'ÉCOSYSTÈME DE LA TRANSITION
6. DÉCROISSANCE ENDOGÈNE
7. LA CHAÎNE DE PRODUCTION VERTE

LA TAXE CARBONE

La taxe carbone

- Intégrer les externalités
- Incidence et acceptabilité
- La taxe carbone, ça marche

La théorie

- Arthur Pigou, Cambridge, (1920):
  - Failles de marché => externalités
  - Résolu par une « taxe Pigouvienne »

- Ronald Coase, Chicago, (1960):
  - Résolution par l'allocation de droits de propriété : permis d'émissions

- En l'absence d'incertitudes, la taxe et le marché de permis génèrent le même résultat

- Large consensus des économistes en faveur du prix du carbone

La taxe carbone

- Idée de la taxe carbone :
  - Taxer l'utilisation d'énergies productrices de CO_2 afin d'internaliser l'externalité négative (pollution) par les ménages et ainsi réduire les émissions
  - Principe du *pollueur-payeur*

- Tentative échouée de mise en place en 2000 par le gouvernement Jospin

- En 2007, suite au *Grenelle de l'environnement,* la loi est votée au Parlement, mais retoquée par le Conseil constitutionnel

La taxe carbone

- Mise en place en 2014 sous le gouvernement Valls sous le nom de *contribution climat-énergie (CCE)* :
  - Taux initial équivalent à 7 euros par tonne de CO_2 et s'applique sur le prix des biens avant TVA, soit environ 2 centimes par litre l'essence
  - Passage progressif à 56 euros par tonne en 2020, soit environ 13,5 centimes par litre l'essence
- Projet de loi de finance 2018 confirme cette planification
  - Mouvement des gilets jaunes en novembre 2018 et suppression de la hausse prévue pour le 1er janvier 2019
- Nécessité de la lutte contre le réchauffement climatique semble consensuelle : 85 % des Français sont inquiets du réchauffement (IFOP, octobre 2018).

Valeur sociale du carbone

- La valeur sociale du carbone se calcule à partir d'un certain nombre de données que nous avons déjà discuté :
  - Le taux d'actualisation (équitable ou comptable), pour faire peser plus ou moins l'avenir des générations futures
  - La sensibilité du climat aux émissions, déterminée par les modèles climatiques et les observations empiriques
  - La fonction de dommages qui traduit la hausse des températures en dommages (en €)

Différents calculs du prix du carbone

- Si l'on prend en compte tous ces paramètres, on obtient un coût social d'une tonne de carbone de 185$ en 2022.

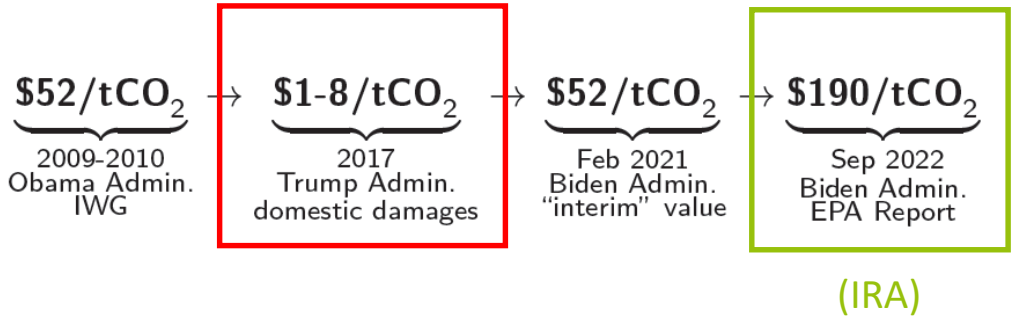
- Si l'on considère une trajectoire de baisse des émissions (tableau), le prix nécessaire pour suivre cette trajectoire augmente au fil des décennies.

Taux d'actualisation

Emission Year	SC-CO_2 (2020 dollars per metric ton of CO_2) 2.5%	2.0%	1.5%
2020	120	190	340
2030	140	230	380
2040	170	270	430
2050	200	310	480
2060	230	350	530
2070	260	380	570
2080	280	410	600

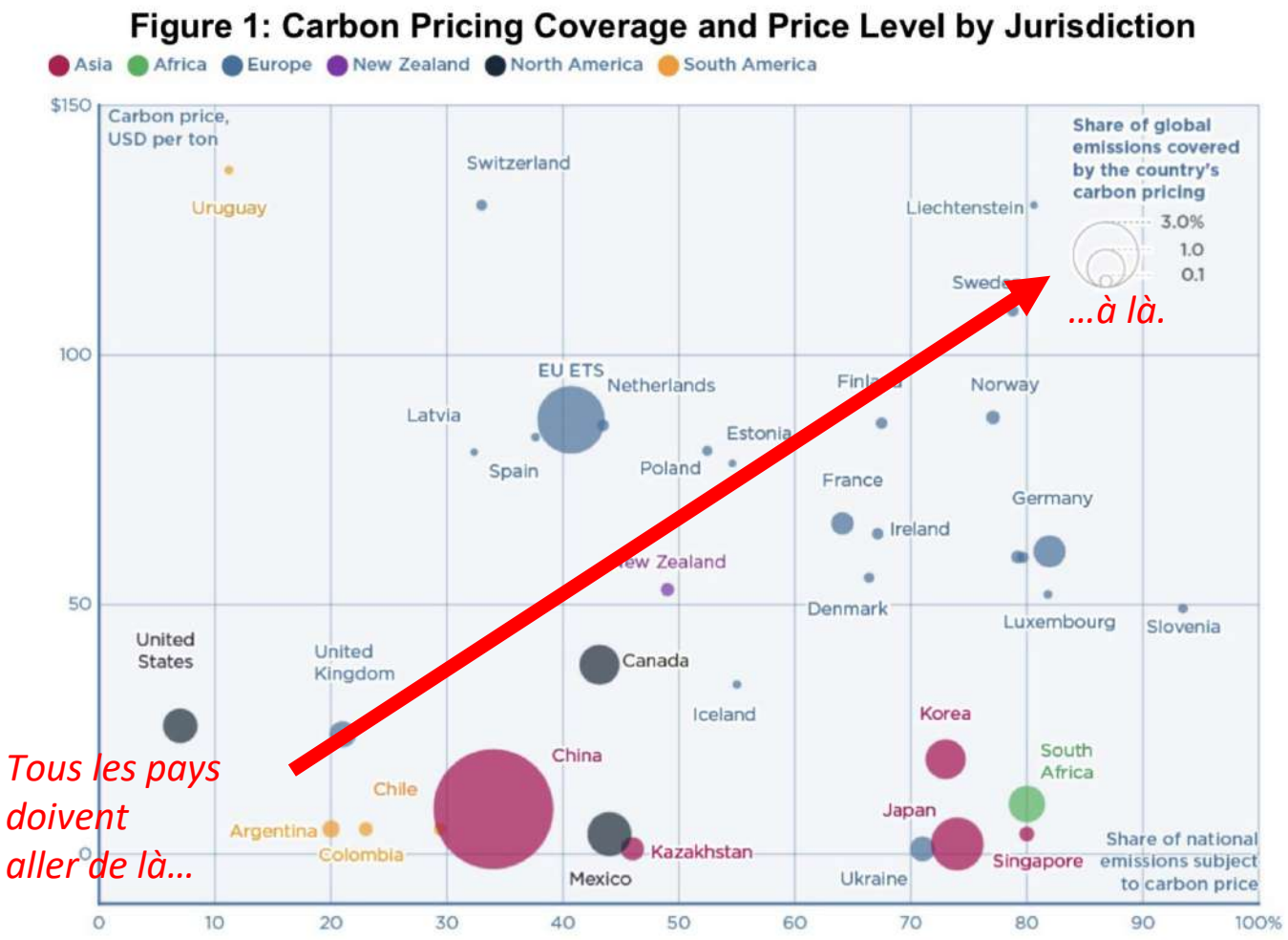
Avec un taux d'actualisation de 5% le prix du carbone tombe à 11$...

The SCC in the US Climate Policy



Pays ayant un prix du carbone aujourd'hui

- On observe ici les pays qui ont intégré un coût du carbone dans leurs politiques économiques.
- En abscisse, la position correspond à la part des émissions couvertes par les régulations. En ordonnées, le prix du carbone dans le pays.
- Un pays situé en haut à droite est un pays dont toutes les émissions sont couvertes et par un prix du carbone élevé. Au contraire, un pays en bas à gauche est un pays qui ne couvre que peu de ses émissions et qui fixe un prix trop bas.
- La taille du disque représente la part des émissions de l'économie en question dans les émissions mondiales.



Source : FMI

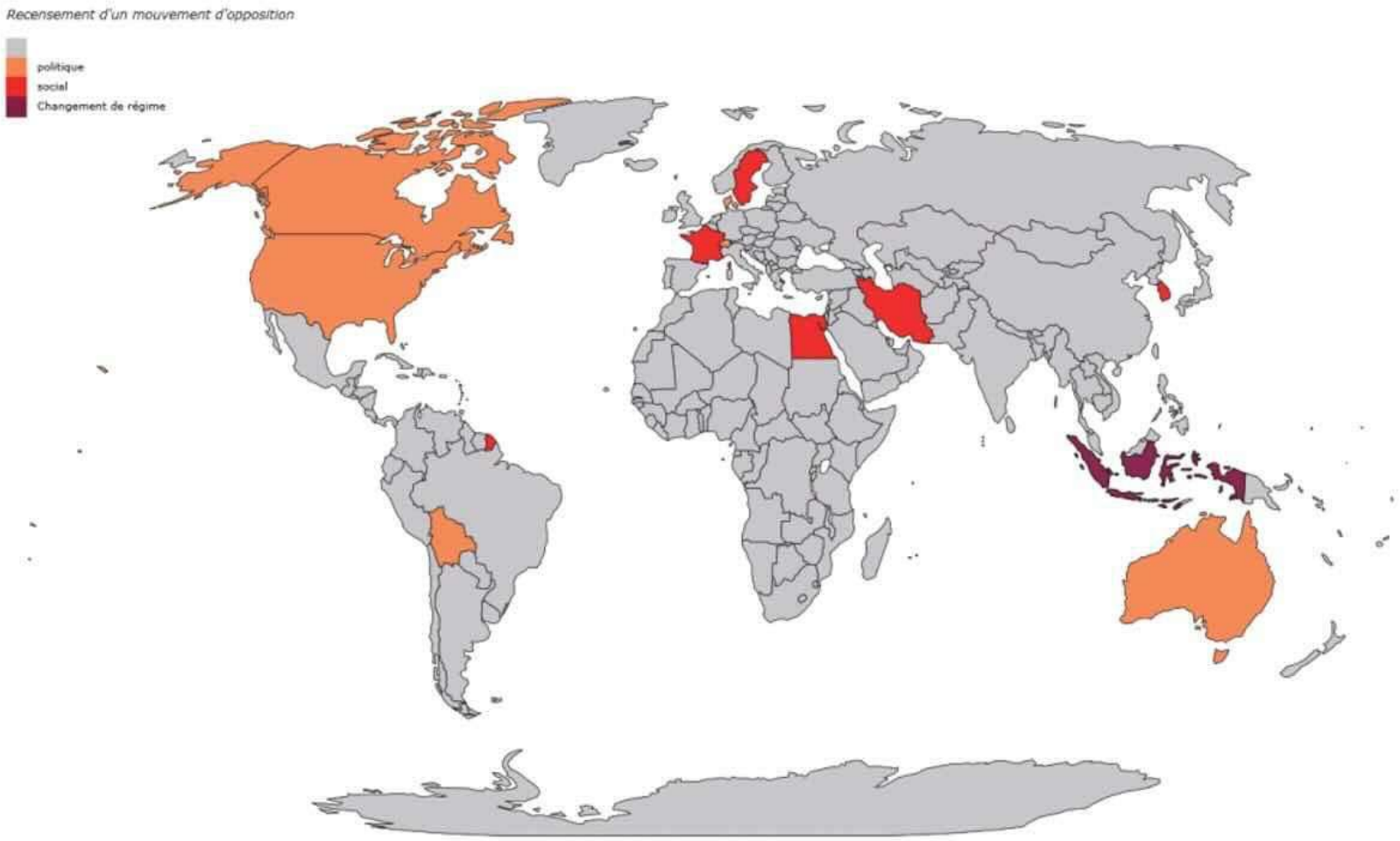
Les prix influencent nos vies…

- Nous faisons des choix en fonction des prix : c’est le signal prix

- L’élasticité de la demande aux prix de l’énergie : ~-0.8.
  - Une augmentation du prix de l’essence de 10% réduit sa consommation de 8% sur le long-terme (sur le court-terme ~0 !!)
  - Voitures plus petites et plus électriques dans l’UE ou le prix de l’essence est plus élevé qu’aux États-Unis où l’essence est plus accessible

Tensions à travers le monde

Graphique 1. **Carte des mobilisations récentes face à la fiscalité énergétique dans le monde**



Les mobilisations recensées sur cette carte ne sont pas exhaustives, ont des motivations parfois différentes de la seule mise en œuvre d'un prix du carbone (subventions à l'utilisation des énergies hydrocarbonées pour le déplacement, voire répartition des ressources hydrocarbonées locales) et sont de différentes natures.

Revue de la presse internationale, traitement par les auteurs.

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Acceptabilité

- La mise en place concrète de politiques environnementales reste largement débattue en France (mouvement des *gilets jaunes*)
  - Le relèvement de la taxe carbone a été perçu comme une taxe supplémentaire ***davantage motivée par des considérations budgétaires*** que pour une politique en faveur du climat
  - Elle est aussi apparue comme ***injuste***, notamment vis-à-vis des ménages les moins aisés et de ceux qui ont peu de possibilités de substitution, par exemple, sur leurs moyens de transport.

- Défi : Proposer des modifications profondes pour construire un dispositif efficace et juste

=> Question de l'incidence et de l'utilisation des recettes

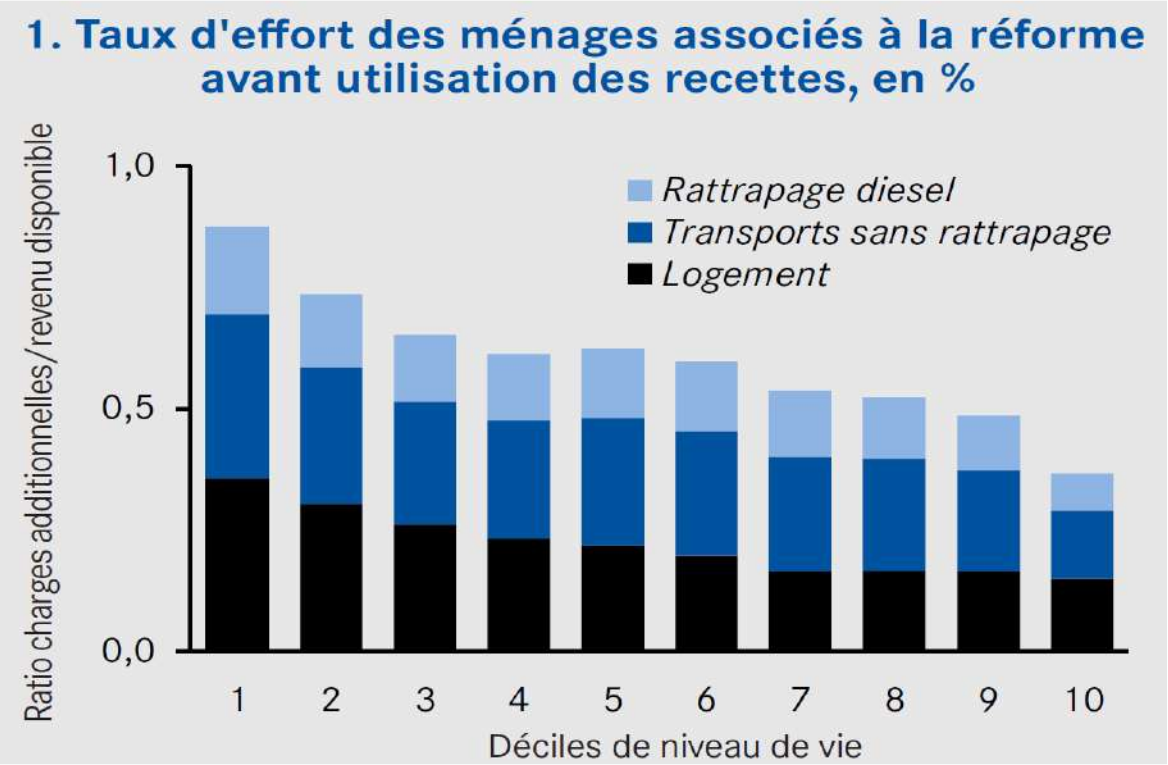
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Efforts induits par une augmentation de la taxe carbone de 44,6 à 86,2 €/tCO_2

- L'effort d'un ménage correspond au surplus d'impôts qu'il est amené à payer en proportion de son revenu disponible.

- Cette figure montre que le taux d'effort pour la taxe carbone est plus élevé pour les ménages qui ont le niveau de vie le plus bas.

- La taxe est dite régressive.



Source : Bureau, Henriet et Schubert 2019, et Conseil d'Analyse Economique.

L'incidence d'une augmentation n'est pas homogène

- On mesure ici la réponse des ménages à une augmentation du prix de l'essence. Celle-ci dépend des moyens de transport alternatifs et du niveau de vie des ménages.

- On note toutefois qu'elle est assez faible pour les ménages parisiens du top10% et qu'elle est la plus forte pour les derniers 10% des villes moyennes

Tableau 1. Élasticités prix des ménages pour les carburants, par niveau de vie et type de commune

Déciles	Communes rurales	Petites villes	Villes moyennes	Grandes villes	Paris
1	– 0,54	– 0,55	– 0,58	– 0,55	– 0,49
2	– 0,54	– 0,54	– 0,56	– 0,54	– 0,45
3	– 0,52	– 0,53	– 0,56	– 0,51	– 0,47
4	– 0,52	– 0,51	– 0,53	– 0,50	– 0,44
5	– 0,51	– 0,50	– 0,54	– 0,47	– 0,42
6	– 0,49	– 0,50	– 0,51	– 0,47	– 0,36
7	– 0,48	– 0,46	– 0,48	– 0,44	– 0,41
8	– 0,45	– 0,44	– 0,46	– 0,42	– 0,34
9	– 0,45	– 0,42	– 0,44	– 0,36	– 0,29
10	– 0,38	– 0,37	– 0,37	– 0,30	– 0,17

Source : Douenne (2018).

Utilisation des recettes

- La taxe carbone produit des recettes. L’acceptabilité de la taxe dépend donc de la manière d’utiliser ces recettes.

- Différentes mesures sont plus ou moins efficaces pour soulager les ménages qui font face à des hausses de prix élevées et inciter à changer les comportements

- Les aides ciblées sur l’énergie soulagent les ménages qui font face à une hausse de la facture d’énergie, toutefois elles désincitent à changer de moyens de transports et/ou de chauffage.

- Les investissements publics dans des infrastructures ou de la recherche ont un effet très positif pour la transition mais sont assez peu perceptibles par les ménages, ce qui rend leur acceptabilité limitée…

La taxe carbone, ça marche !

Deux exemples simples

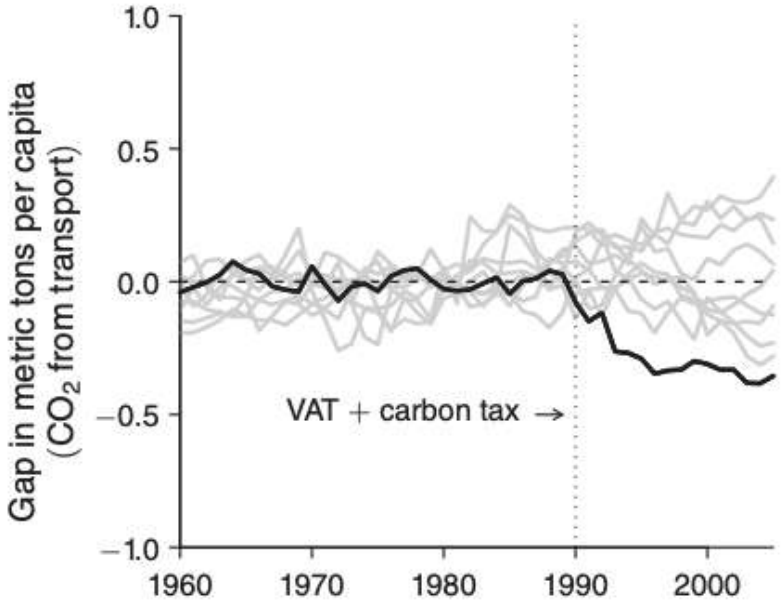
- Taxe carbone en Suède
- ETS en Europe

Exemple du transport en Suède

- Andersson (2019 AEJ) étudie l'implémentation en 1991 d'une taxe carbone ciblant surtout le secteur des transports (les autres secteurs bénéficiant de réductions) ainsi qu'une hausse de la TVA

- Les émissions du secteur des transports de la Suède chutent durablement par rapport à l'ensemble des économies comparables affichées sur le graphique du haut.

- La baisse des émissions est due à la transition massive de l'essence vers le diesel affichée sur le graphique du bas.



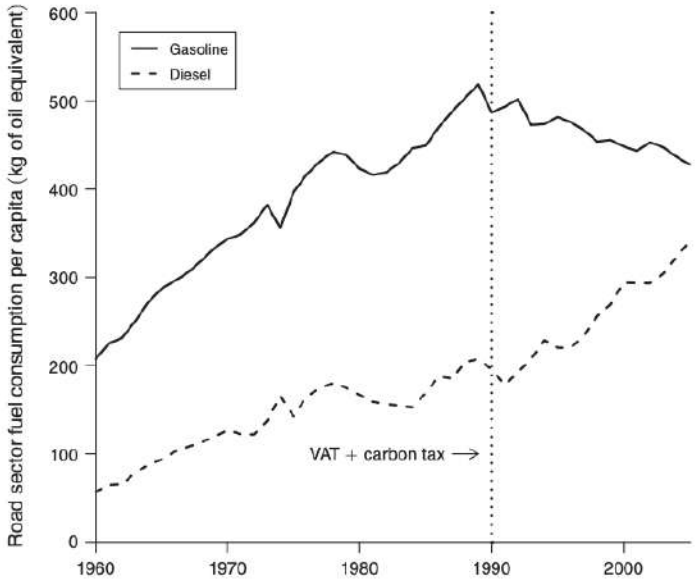


FIGURE 2. ROAD SECTOR FUEL CONSUMPTION PER CAPITA IN SWEDEN 1960–2005

Effet taxe carbone en UE

- Nous allons revenir en détail sur l'organisation du marché carbone en UE plus tard dans ce cours lorsque nous parlerons de politique industrielle.

- Dans certains secteurs en UE, chaque tonne supplémentaire de CO_2 émise nécessite un permis. Ces permis s'échangent sur le marché carbone qui permet d'identifier à chaque instant le prix implicite d'une tonne de carbone.

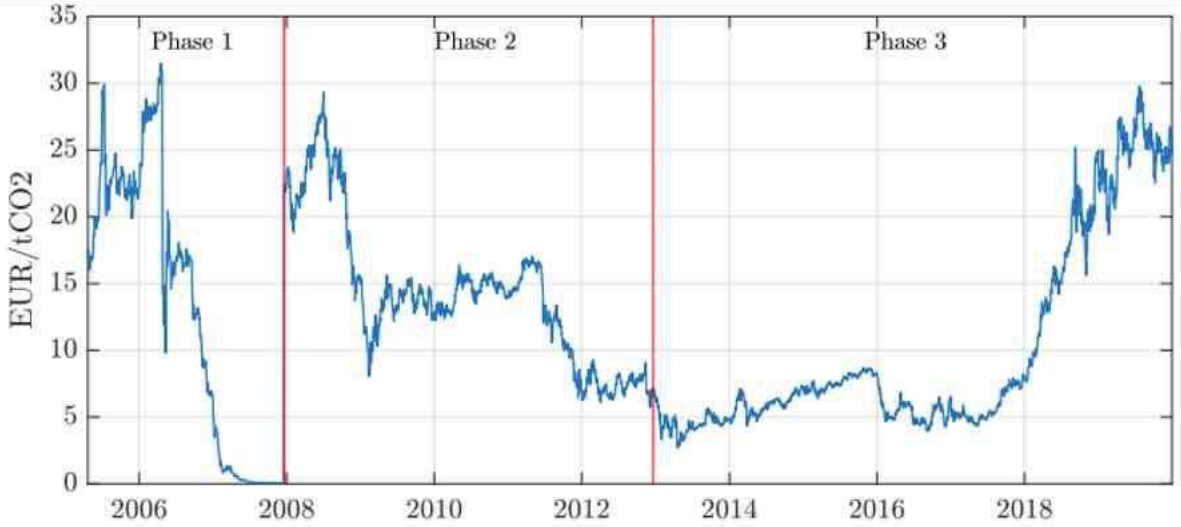


Figure 1: The EU Carbon Price

Notes: The EU carbon price, as measured by the price of the first EUA futures contract over the different phases of the EU ETS.

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Effet taxe carbone en UE

- Cette étude montre l'impact de la régulation carbone européenne, qui affecte le prix du carbone.

- On observe ici l'effet instantané et sur plusieurs mois d'une augmentation du prix du carbone en UE.

- Les émissions chutent largement, mais on observe aussi que la hausse du prix du carbone se transmet au niveau général des prix (HICP) et particulièrement aux prix de l'énergie.

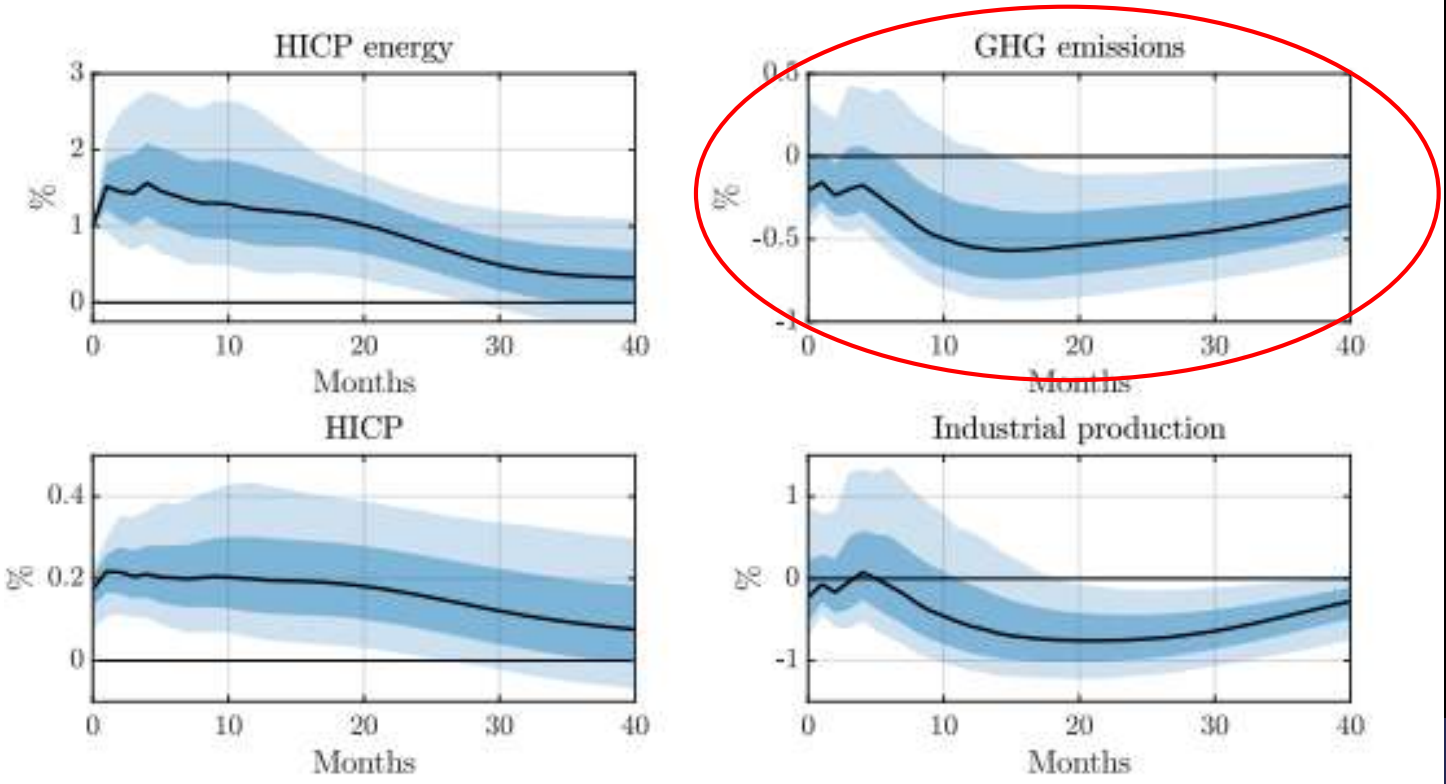


Figure 3: Impulse Responses to a Carbon Policy Shock

Notes: Impulse responses to a carbon policy shock, normalized to increase the HICP energy by 1 percent on impact. The solid line is the point estimate and the dark and light shaded areas are 68 and 90 percent confidence bands, respectively.

HICP : Harmonized Index of Consumer Prices

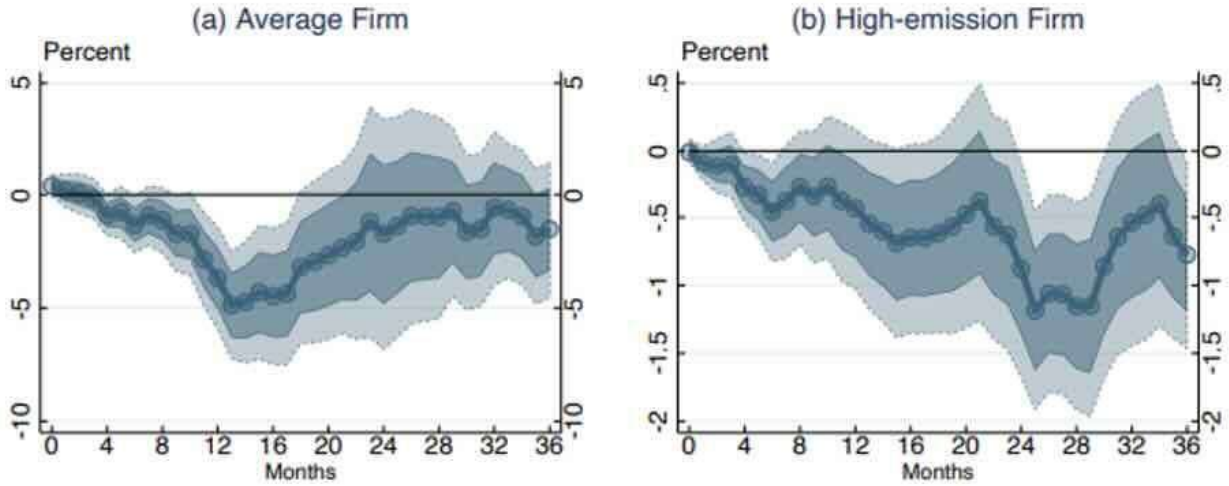
Effet sur la valorisation des firmes

- De la même manière, on peut identifier l'effet d'un resserrement de la régulation climatique sur la valorisation des firmes.

- On voit à gauche que toutes les firmes sont affectées et voient leur valorisation baisser significativement.

- En particulier, les firmes classifiées comme à « hautes émissions » voient leur valorisation chuter de 1 point de pourcentage supplémentaire.

Figure 4 THE EFFECT OF CARBON PRICING SHOCKS: FIRM-LEVEL EQUITY PRICES



NOTE. Effect of a one standard deviation increase in the carbon policy surprise (CPS) series on equity prices in the firm-level data. Panel (a) reports the equity price response of the average firm, as captured by the coefficients β^h in equation (4); panel (b) reports the equity price response of a high-emission firm (i.e. whose CO_2 emissions are one standard deviation above the average CO2 emissions) relative to the average firm, as captured by the coefficients γ^h in equation (5). Shaded areas display 68 percent and 90 percent confidence intervals computed with heteroskedasticity and autocorrelation robust standard errors (two-way clustered, at the firm-month level).

COLLÈGE DE FRANCE 1530

PLAN DU COURS

1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE
2. LA TAXE CARBONE
3. L'INNOVATION VERTE
4. LA POLITIQUE INDUSTRIELLE
5. L'ÉCOSYSTÈME DE LA TRANSITION
6. DÉCROISSANCE ENDOGÈNE
7. LA CHAÎNE DE PRODUCTION VERTE

INNOVATION VERTE

L'innovation

$$V_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{\text{Énergie}} \times \frac{\text{Énergie}}{PIB} \times \frac{PIB}{Pop} \times Pop$$

- Face aux coûts de la transition :
  - Innover (baisse de $\frac{\text{Énergie}}{PIB}$ ou $\frac{V_{CO_2}}{\text{Énergie}}$ ou $\frac{V_{CO_2}}{PIB}$)
  - Ou décroître ? (baisse de $\frac{PIB}{Pop}$ ou Pop)

- Diriger l'innovation vers les technologies "vertes" : nouvelles sources d'énergies, économies d'énergie, procédés bas-carbone, etc…

- L'innovation est endogène et l'on peut l'influencer !

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Innovation verte

- - Mitigation
- - Adaptation
- - Amelioration

L’innovation verte

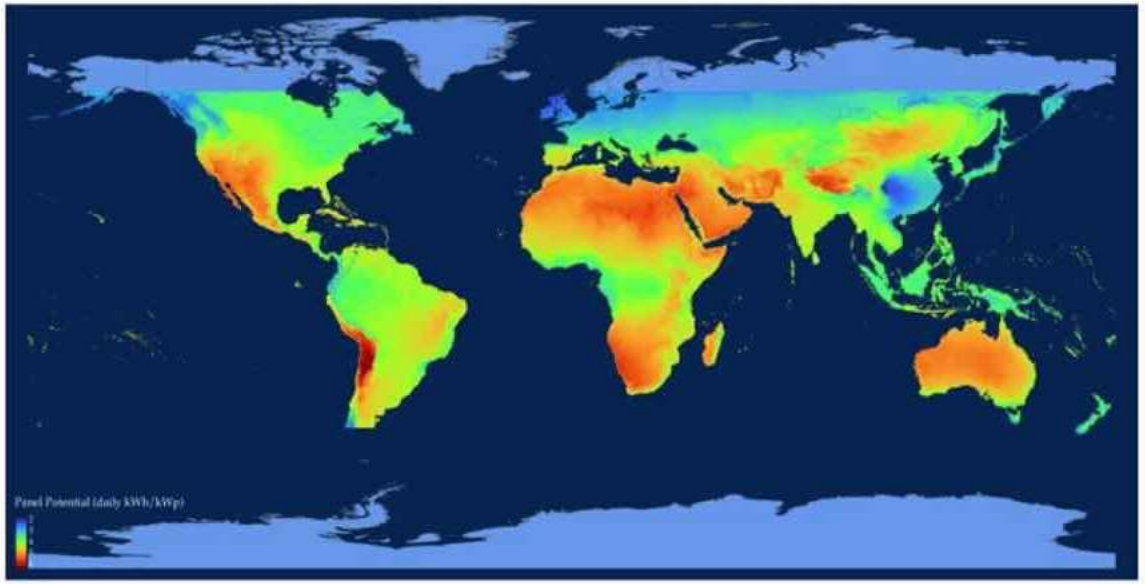
- **Quelques faits et perspectives**
- Théorie et politiques d’innovation
- Analyse empirique

Quelques statistiques

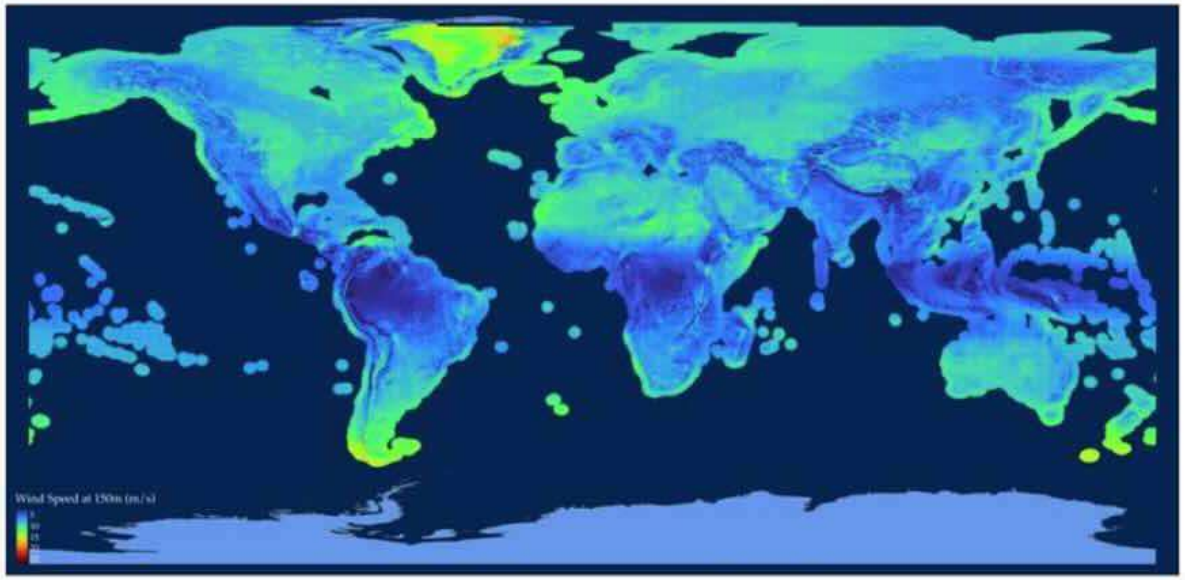
- Le virage vers les énergies renouvelables est en marche !
- Quelles technologies pour la suite ?

Le potentiel renouvelable mondial est immense

(a) Solar Potential

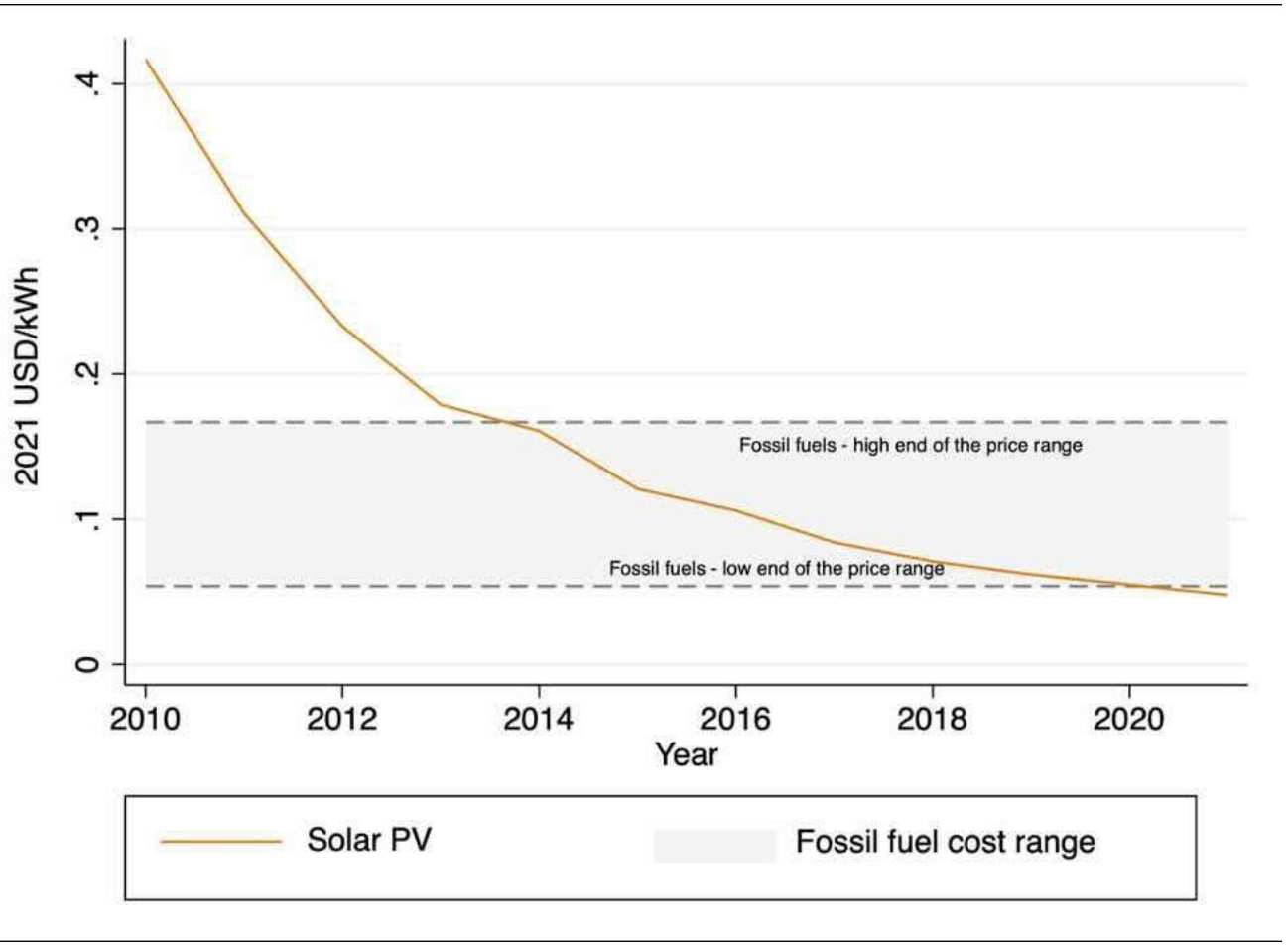


(b) Wind Potential



Notes: Panel (a) shows solar panel potential (defined as daily kWh per peak kilowatt rating of the panel) using data from the Global Solar Atlas. Panel (b) shows wind electricity potential (average daily wind speeds) using data from the Global Wind Atlas.

Les renouvelables sont déjà rentables



Coût unitaire de l'énergie solaire photovoltaïque

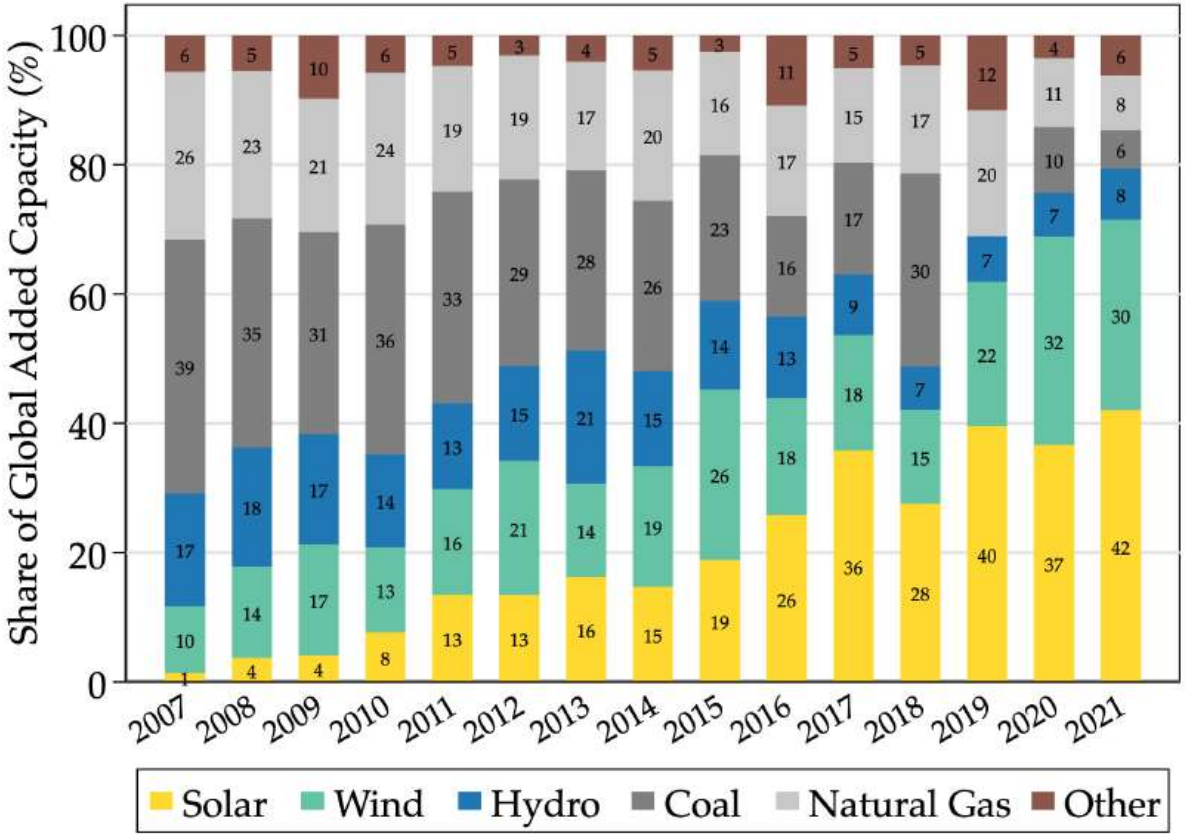
- On observe ici la baisse du prix du kWh d'énergie solaire avec le temps grâce à l'innovation et l'apprentissage.

- Cette source d'énergie est déjà au plus bas de la fourchette de prix du pétrole.

Les renouvelables sont rentables

- Donc nous en installons de plus en plus.
- On voit ici la part de chaque énergie dans la nouvelle capacité installée mondiale.
- Les renouvelables en 2021 représentent plus de 70%.

Figure A1: Aggregate Capacity Additions



Installations annuelles mondiales par type d'énergie

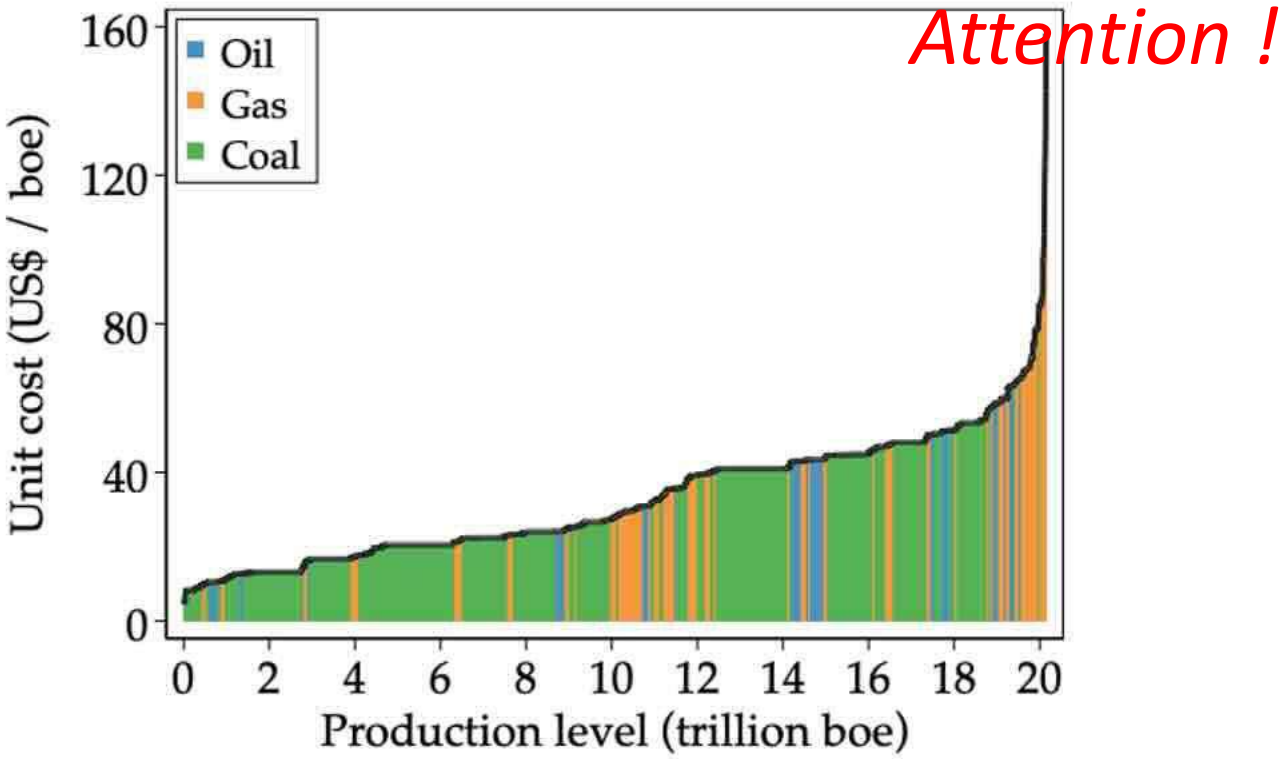
Distribution des coûts d'extraction fossiles

- Il reste toutefois de très larges stocks d'énergies fossiles disponibles, et ce pour un coût relativement bas.

- On illustre ici le prix de chaque énergie en fonction de son coût d'extraction.

- Il reste des stocks énormes (de charbon en particulier) à des prix extrêmement bas, d'où la nécessité de fixer un prix au carbone élevé.

Figure A9: World Fossil Resources



Notes: This figure shows the fossil fuel resources of the globe ordered by current (2021) extraction cost for three types of fuel: coal, oil and natural gas. The source data is from Welsby et al. (2021).

Nouvelles technologies vertes

- Pour atteindre nos objectifs, il nous faut retirer du CO_2 de l'atmosphère.

- Pour cela plusieurs technologies sont envisagées : capturer le CO_2 directement dans l'air (DAC) ou bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (BECCS)

- Ces technologies sont encore trop chères et nécessitent de l'innovation pour devenir rentables a grande échelle.

L’innovation verte

- Quelques faits et perspectives
- **Théorie et politiques d’innovation**
- Analyse empirique

L’innovation dirigée

- Acemoglu, Aghion, Bursztyn et Hémous (2012) ont développé un modèle de croissance soutenable avec innovation verte.

- Les innovateurs dirigent leurs efforts vers les technologies vertes ou polluantes selon les incitations économiques auxquelles ils font face.

Dépendance au sentier

- Toutes choses égales par ailleurs, les entreprises tendent à innover dans les technologies ou elles ont déjà acquis une expertise, donc dans les technologies polluantes si elles ont déjà beaucoup innové dans ces technologies dans le passé.

Agir au plus tôt

- Sans intervention de politiques publiques, l’innovation tend a être dirigée vers des technologies fossiles/polluantes

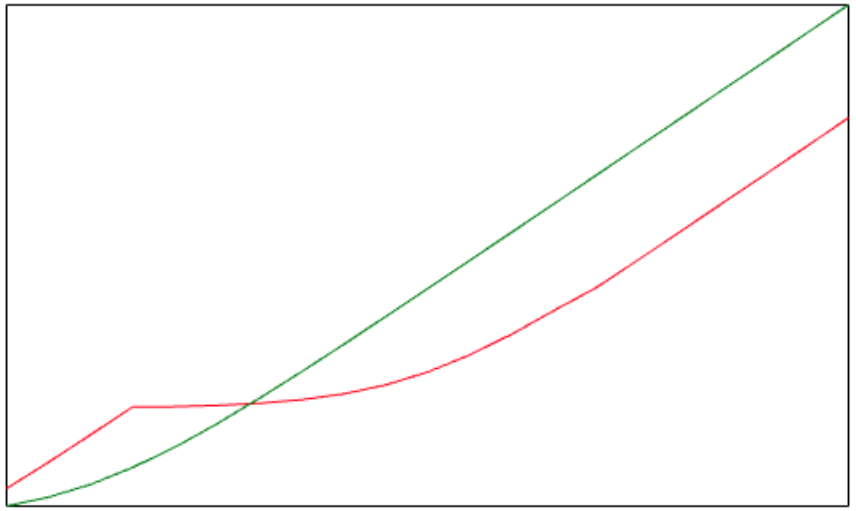
- En conséquence, le gap entre les technologies vertes et polluantes s’accentue, ce qui aggrave le problème de dépendance au sentier.

- Intervenir pour forcer les entreprises a innover dans les technologies vertes est coûteux à court terme (moins de croissance tant que les technologies vertes sont en retard)

Attendre est très coûteux

- Mais attendre est couteux à long terme car le gap entre technologies polluantes et technologies vertes s'accroit, donc il faut une intervention plus forte plus longtemps pour réussir la transition vers les technologies vertes.

Taux d'actualisation	1%	1.5%
Consommation perdue en repoussant la transition de 10 ans	5.99%	2.31%
Consommation perdue en repoussant la transition de 20 ans	8.31%	2.36%



COLLÈGE DE FRANCE 1530

Deux instruments

- Deux types d’externalités:
  - Externalité environnementale (pollution)
  - Externalité de savoirs accumulés (dépendance au sentier)

- Il faut donc deux instruments de politique économique, pas seulement une taxe carbone

Deux instruments

- Utiliser seulement une taxe carbone au lieu de subventions + taxe carbone augmente les coûts de la transition

  => reduction de la consommation actualisée de 1,33%

- Cela se traduit par une taxe carbone 15 fois plus élevée pendant les 5 premières années, puis 12 fois plus élevées par la suite.

Taux d'actualisation	1%	1,5%
Consommation perdue	1,33%	1,55%

Nord-Sud

- Green innovation in the North has potential to trigger green innovation in South
  - Subsidize technology transfers
- Under free-trade, danger that some countries turn into pollution heavens
  - Role for Carbon Tariffs

L’innovation verte

- Quelques faits et perspectives
- Théorie et politiques d’innovation
- **Analyse empirique**

EVIDENCE FROM THE AUTO INDUSTRY

Philippe Aghion
Antoine Dechelzeprêtre
David Hémous
Ralf Martin
John Van Reenen

AER: Insights 2023

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Prix de l’essence et innovation dans le secteur automobile

DONNÉES

- World Patent Statistical Database (PATSTAT) de l'Office Européen des Brevets (EPO) sur la période 1978-2005
  - Recense tous les brevets deposes auprès de 80 offices à travers le monde

- Nous avons :
  - extrait tous les brevets relatifs à des technologies "propres" et "sales" dans l'industrie automobile (classification OCDE IPC)
  - et suivi tous les dépositaires ainsi que leur historique de dépos

DONNEES

- On se limite aux brevets *triadiques,* c'est-à-dire déposés dans les 3 offices principaux (EPO, JPO, USPTO)
- Période 1978-2005 :
  - 18 652 brevets dans des technologies « sales » (moteur à combustion)
  - 6 419 brevets dans des technologies « propres » (électrique, hybride, etc.)
  - 3 423 différents dépositaires de brevets (2 427 firmes et 996 individus)

INTERNATIONAL PATENT CLASSES (IPC)

Description	IPC code
Electric vehicles	
Electric propulsion with power supplied within the vehicle	B60L 11
Electric devices on electrically-propelled vehicles for safety purposes; Monitoring operating variables, e.g. speed, deceleration, power consumption	B60L 3
Methods, circuits, or devices for controlling the traction- motor speed of electrically-propelled vehicles	B60L 15
Arrangement or mounting of electrical propulsion units	B60K 1
Conjoint control of vehicle sub-units of different type or different function / including control of electric propulsion units, e.g. motors or generators / including control of energy storage means / for electrical energy, e.g. batteries or capacitors	B60W 10/08, 24, 26
Hybrid vehicles	
Arrangement or mounting of plural diverse prime-movers for mutual or common propulsion, e.g. hybrid propulsion systems comprising electric motors and internal combustion engines	B60K 6
Control systems specially adapted for hybrid vehicles, i.e. vehicles having two or more prime movers of more than one type, e.g. electrical and internal combustion motors, all used for propulsion of the vehicle	B60W 20
Regenerative braking	
Dynamic electric regenerative braking	B60L 7/1
Braking by supplying regenerated power to the prime mover of vehicles comprising engine -driven generators	B60L 7/20
Fuel cells	
Conjoint control of vehicle sub-units of different type or different function; including control of fuel cells	B60W 10/28
Electric propulsion with power supplied within the vehicle - using power supplied from primary cells, secondary cells, or fuel cells	B60L 11/18
Fuel cells; Manufacture thereof	H01M 8
Combustion engines	
Combustion engines	F02 (excl. C/G/ K)

"Clean"

"Dirty"

Nombre de brevets

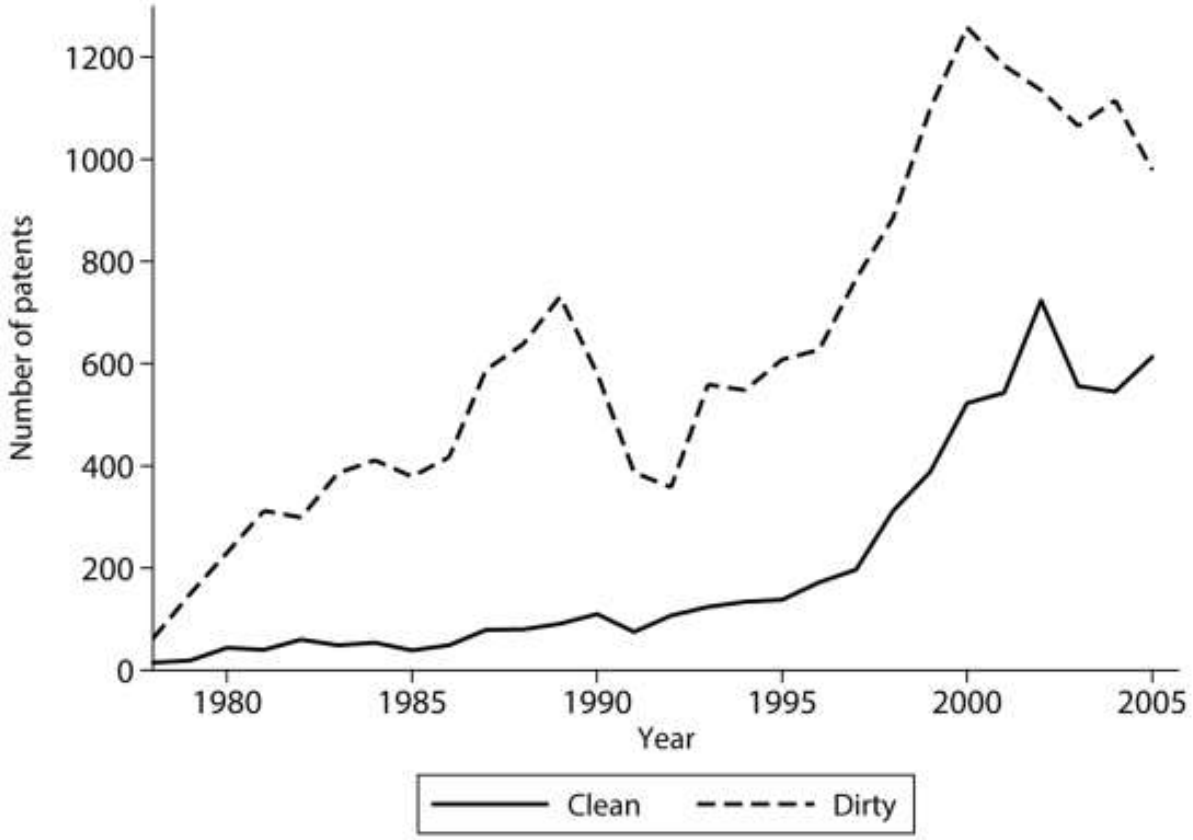


FIG. 4.—Number of annual clean and dirty triadic patents, 1978–2005, filed worldwide. Source: Authors' calculations based on the PATSTAT database.

COLLÈGE DE FRANCE 1530

ESTIMATION

Nombre de brevets triadiques propres pour la firme i en t

Spillovers vert et brun

$$PAT_{CLEAN,it} = \exp(\beta_{C,P} \ln FP_{it} + \beta_{C,1} \ln SPILL_{C,it} + \beta_{C,2} \ln SPILL_{D,it}$$

$$+ \beta_{C,3} \ln K_{C,it} + \beta_{C,4} \ln K_{D,it}$$

$$+ \beta_{C,w} w_{it} + \ln \eta_{C,i} + T_{C,t}) + u_{C,it}$$

Stock d'innovations (brevets) de la firme i l'année précédente

TABLE 3 : PRINCIPAUX RÉSULTATS

	Clean	Dirty
Fuel Price	0.886**	-0.644***
ln(FP)	(0.362)	(0.143)
Clean Spillover	0.266***	-0.058
$SPILL_C$	(0.087)	(0.066)
Dirty Spillover	-0.160*	0.114
$SPILL_D$	(0.097)	(0.081)
Own Stock Clean	0.303***	0.016
K_C	(0.026)	(0.026)
Own Stock Dirty	0.139***	0.542***
K_D	(0.017)	(0.020)
#Observations	68,240	68,240
#Units (Firms and individuals)	3,412	3,412

Notes: Estimation by Conditional fixed effects (CFX), all regressions include GDP, GDP per capita & time dummies. SEs clustered by unit.

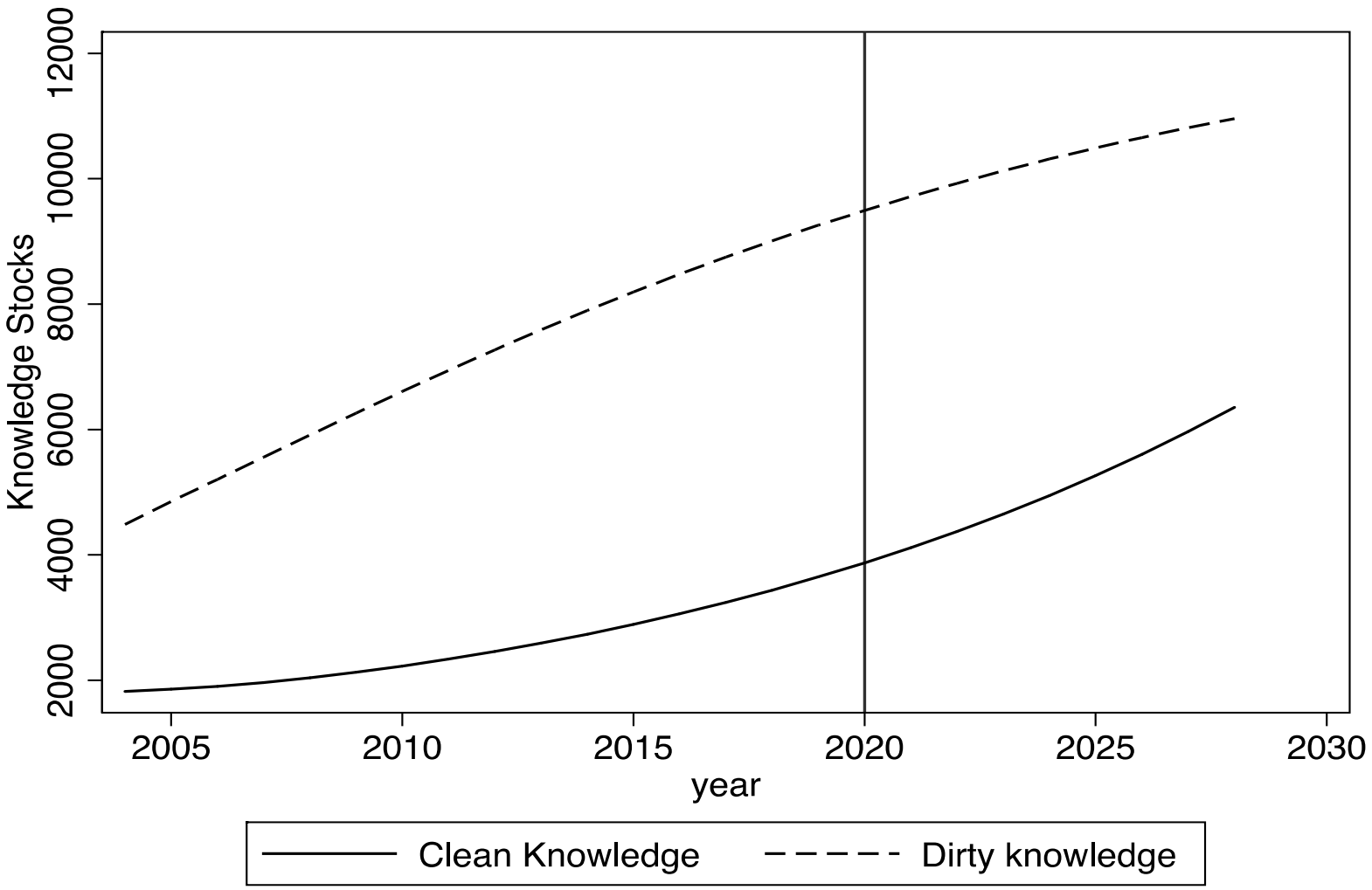
En resume

- Le changement technique peut être orienté vers une innovation «propre» grâce au mécanisme des prix
- *Dependence au sentier:*
  - Mauvaise nouvelle : danger de desastre environnemental en laissez-faire
  - Bonne nouvelle : l'intervention de l'Etat peut permettre de réorienter l'innovation des entreprises vers les technologies vertes

SIMULATIONS

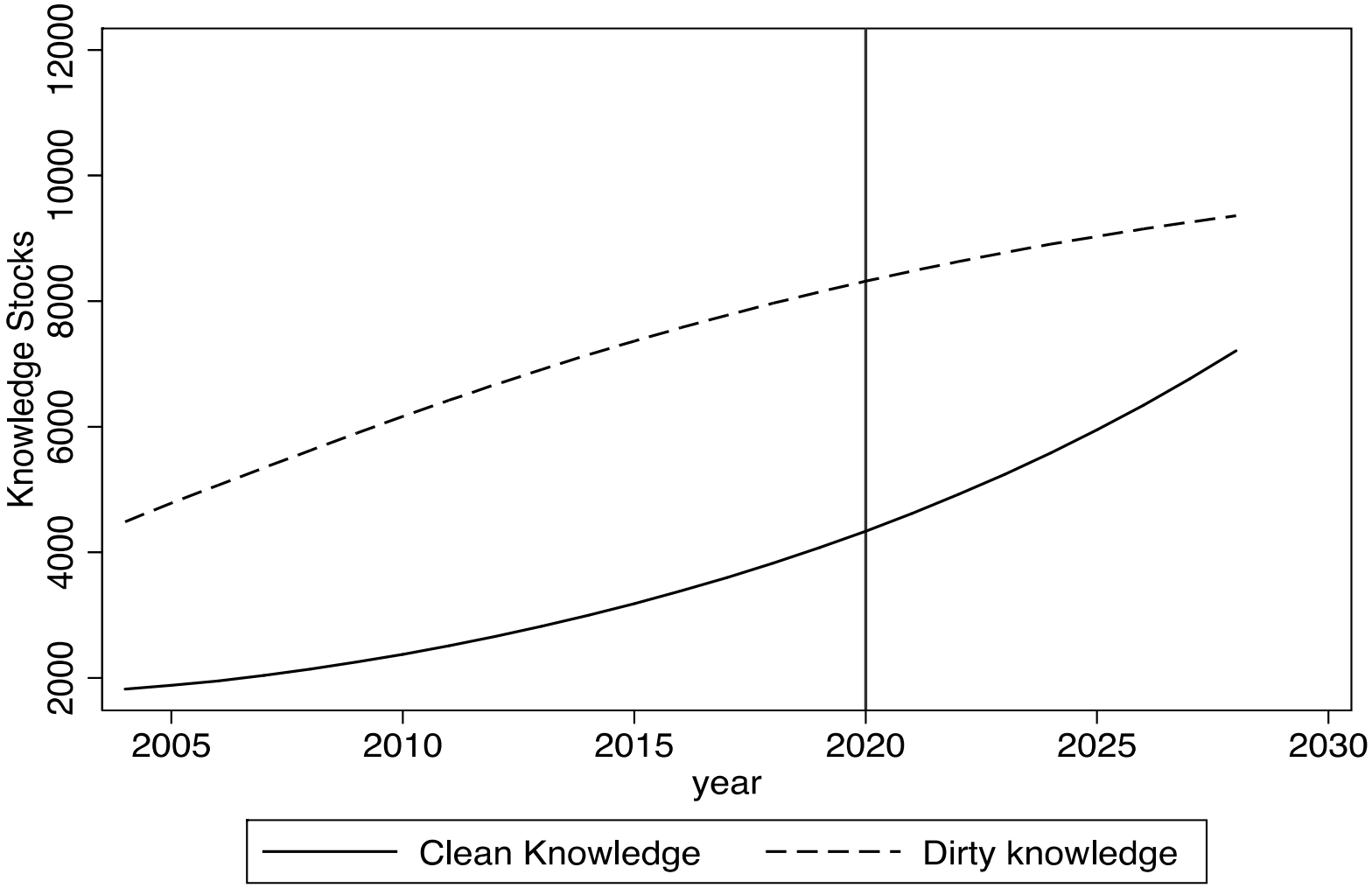
- On utilise le modele estime, et on simule les effets d’augmentations du prix de l’essence compare a un point de depart (prix en 2005)
- Question: a partir de quell moment le stock d’innovations vertes va-t-il depasser le stock d’innovations dans les moteurs a combustion?

FIGURE 5A: BASELINE: NO FUEL PRICE INCREASE



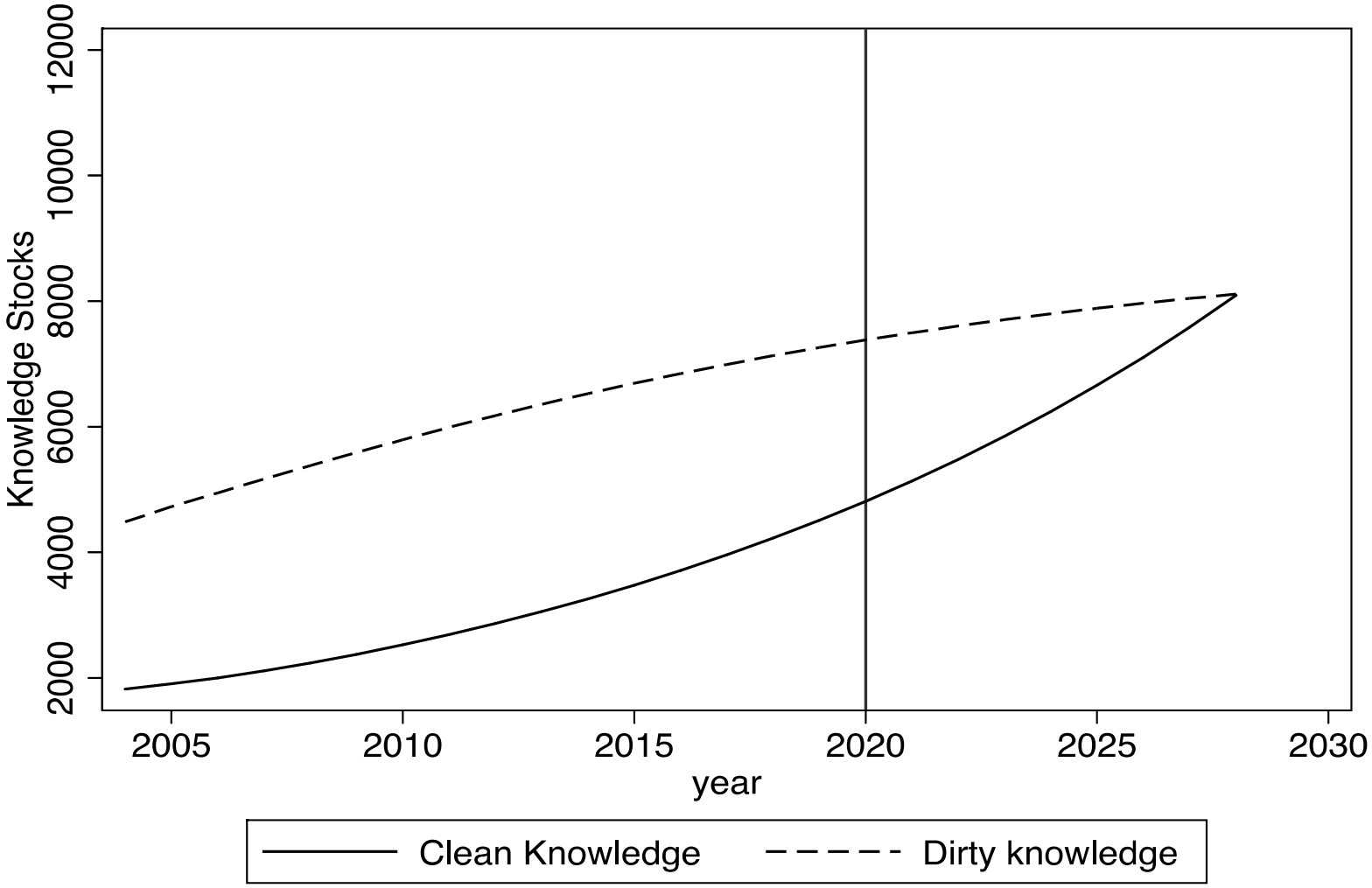
Price increase of 0%

FIGURE 5B: BASELINE: 10% INCREASE IN FUEL PRICE



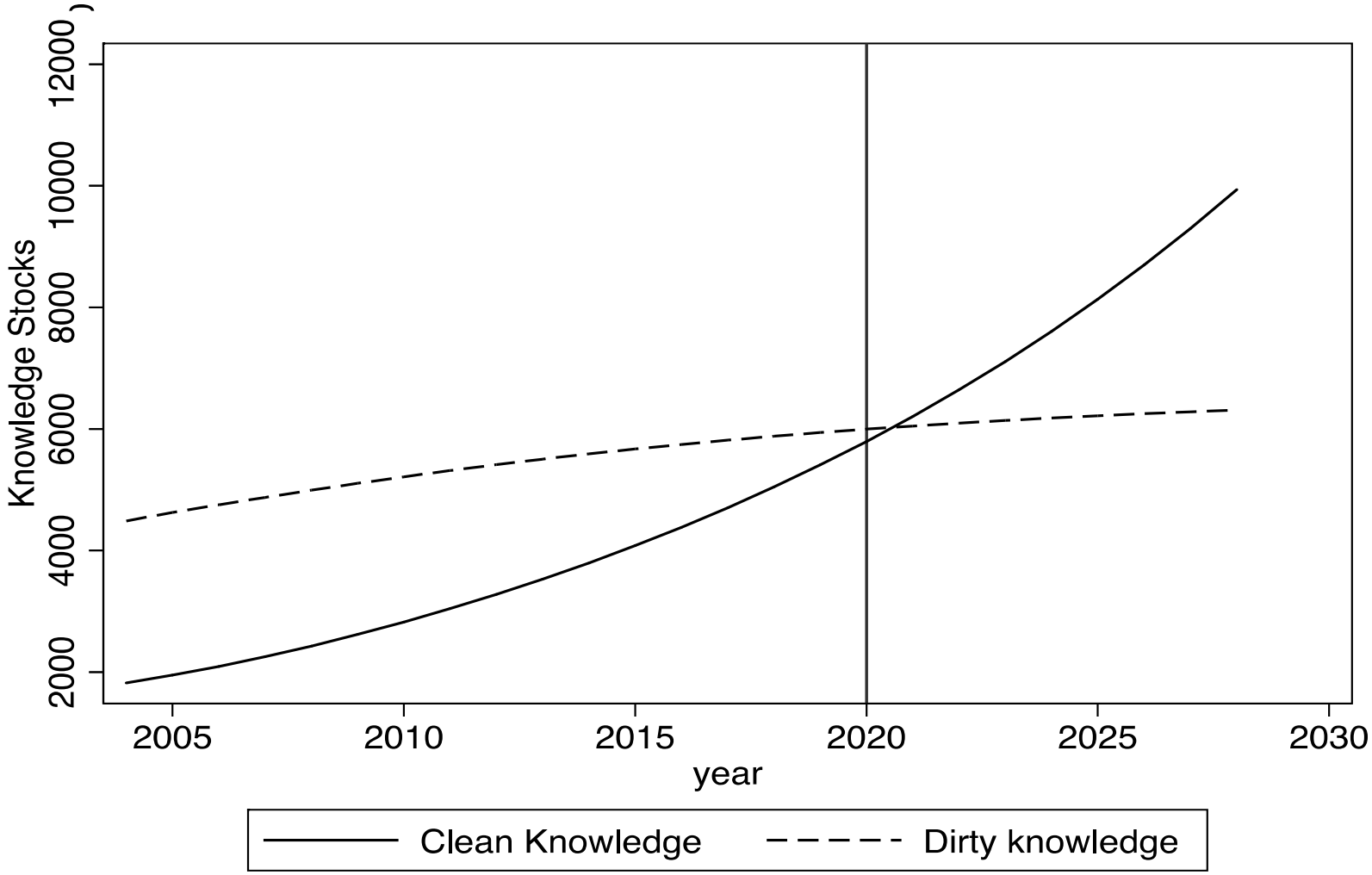
Price increase of 10%

FIGURE 5B: BASELINE: 20% INCREASE IN FUEL PRICE



Price increase of 20%

FIGURE 5D: BASELINE: 40% INCREASE IN FUEL PRICE



Price increase of 40%

Autres implications

La destruction creatrice aide!!

AU TOTAL

- Mauvaise nouvelle : la dépendance au sentier implique que l’économie peut être bloquée dans des technologies “polluantes”.

- Bonne nouvelle : le gouvernement peut éviter le désastre écologique en redirigeant l’innovation vers les technologies vertes.

- Une action rapide s’auto-entretient et apporte une plus grande prospérité après la transition !

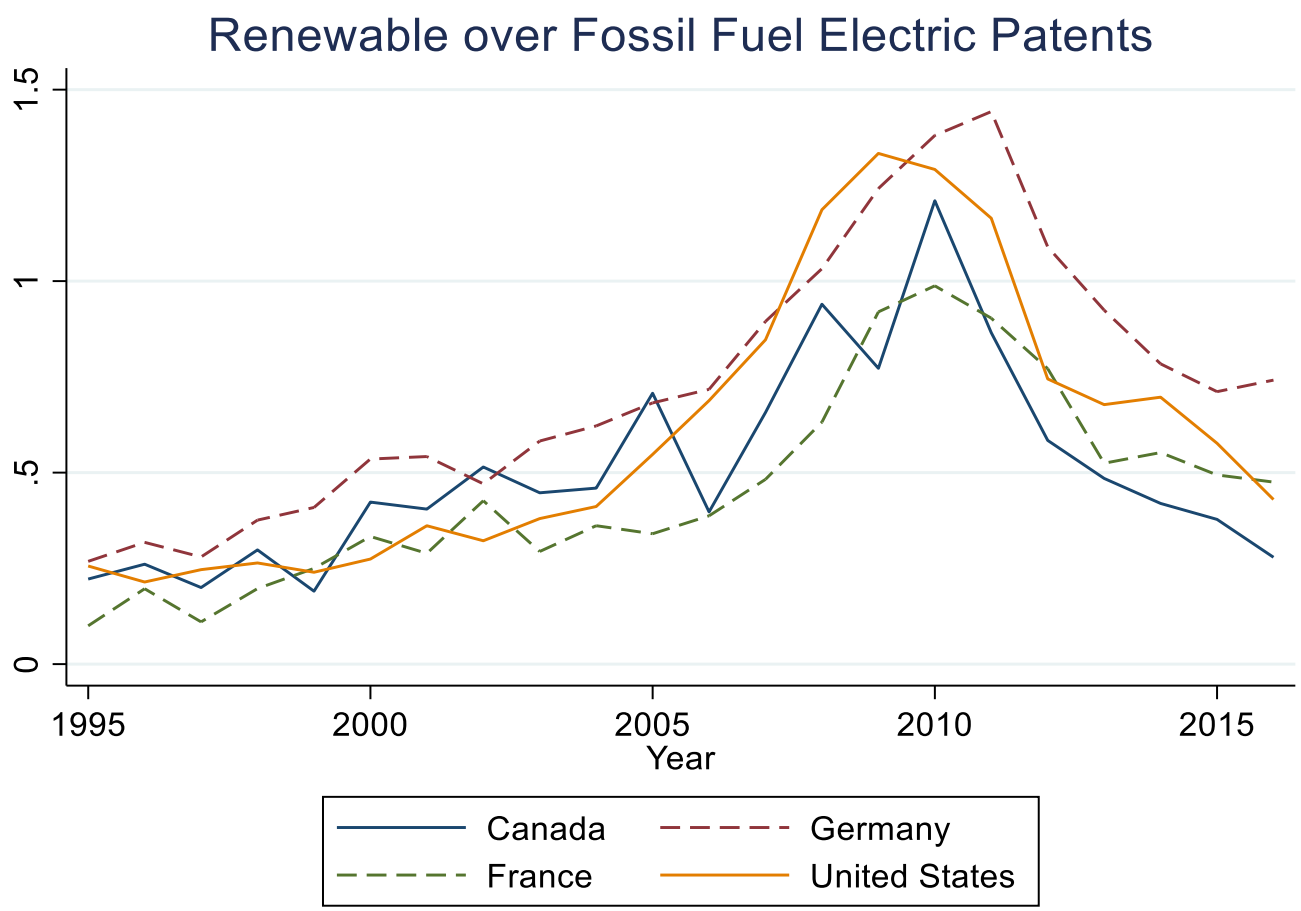
THE LONG-RUN CONSEQUENCES OF THE SHALE GAS REVOLUTION

Daron Acemoglu
Philippe Aghion
Lint Barrage
David Hémous

WP 2024

COLLÈGE DE FRANCE
1530

Effondrement de l'innovation verte



- Le nombre de brevets dans les renouvelables a chuté par rapport aux brevets relatifs à la génération d'électricité fossile (sans prendre en compte l'extraction)

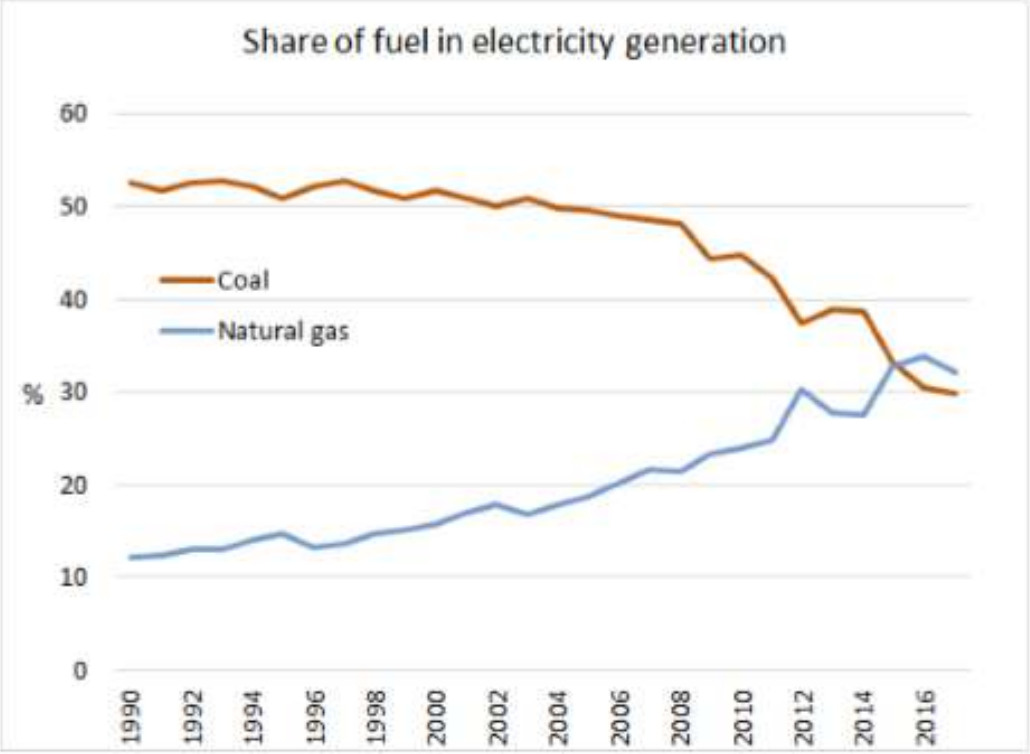
- DTC : la baisse du prix du gaz naturel a redirigé l'innovation des renouvelables vers les énergies fossiles

Hyptohèses alternatives :

- Déplacement de la production d'énergies renouvelables en Chine
- Bulle sur les technologies vertes vers les années 2000s
- L'intermittence est un problème insoluble…

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Rise of gas



- On étudie les effets d'une amélioration exogène de la technologie d'extraction du gaz (de schiste) sur la pollution agrégée sur le court- et long-terme. On s'intéresse en particulier aux dynamiques relatives à la direction de la recherche.

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Effet de court-terme

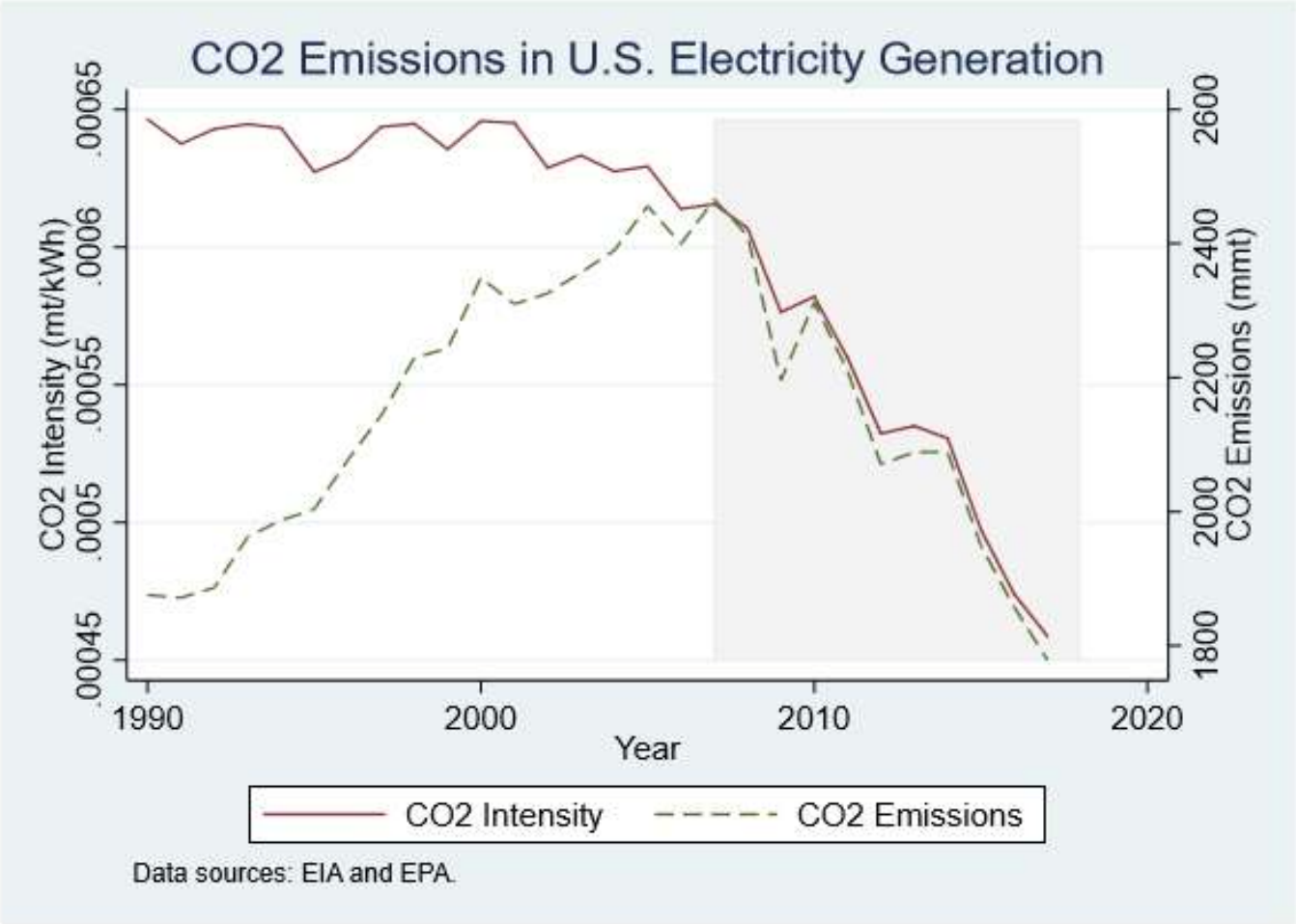
- En l'absence d'innovation (sur le court-terme), le boom a deux effets opposés :
  - Effet de substitution
  - Effet d'échelle

- L'effet de substitution domine si le gaz est suffisamment plus propre que le charbon

Total Effects of Improved Shale Extraction Technology B_{s0}			
	%ΔEmiss.	%ΔEnergy	%ΔCO_2
	Intensity	Consumption	Emissions
Baseline Parameters			
+10% Increase in B_{s0}	-16.7%	+5.5%	-12.1%
+50% Increase in B_{s0}	-21.0%	+9.6%	-13.4%

COLLÈGE DE FRANCE 1530

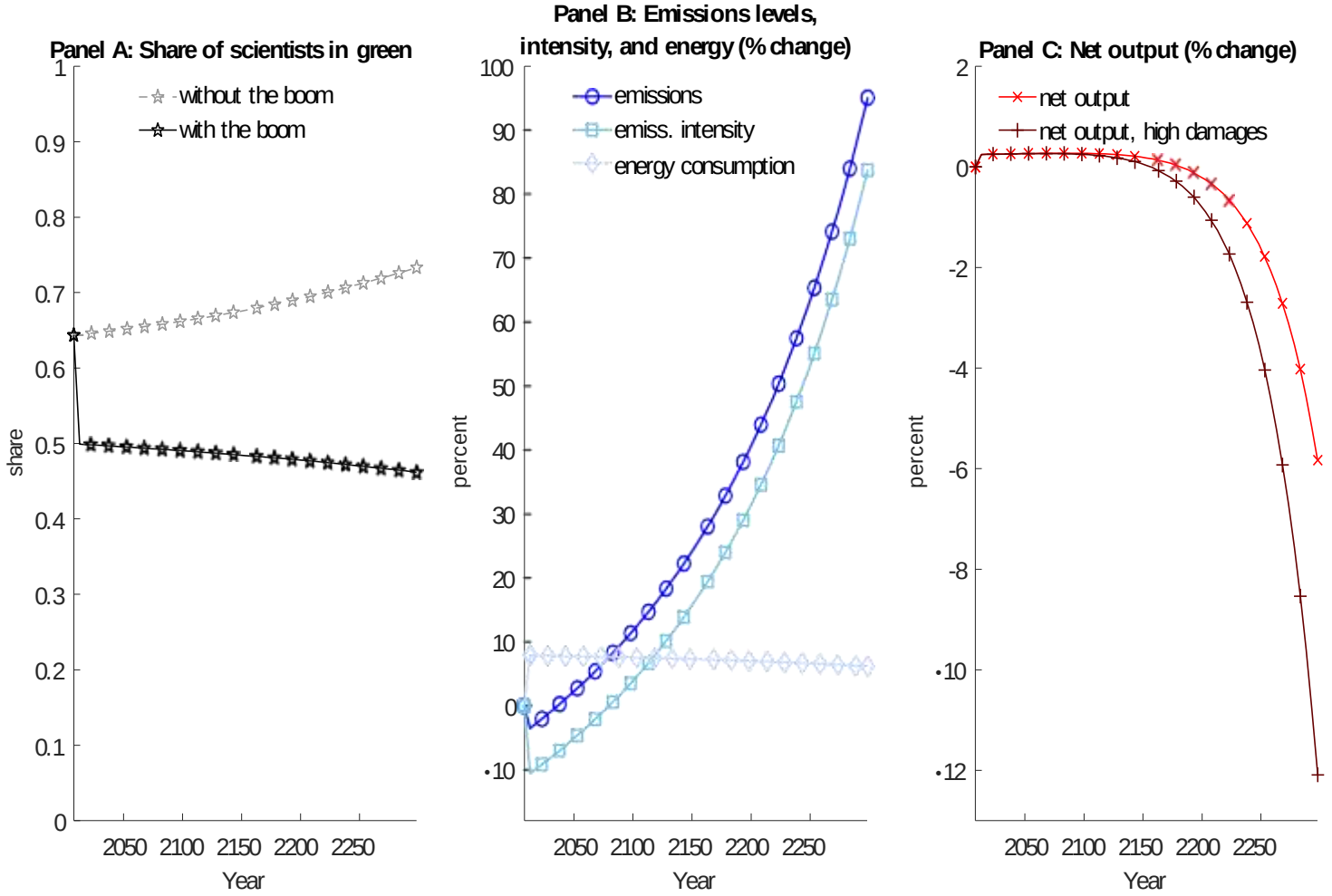
Emissions and Emissions Intensity



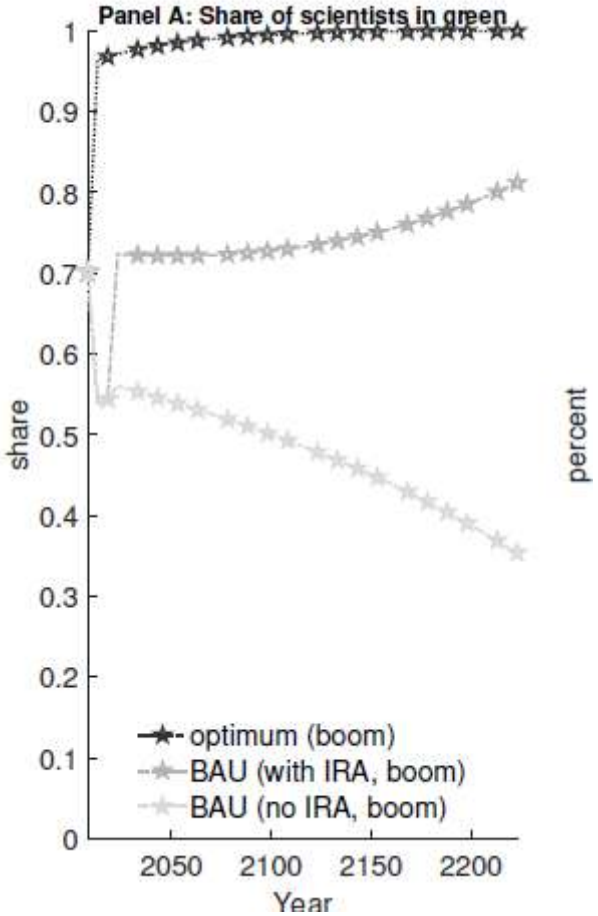
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Effet de long-terme

- On suppose que l'innovation dans chaque source d'énergie est endogène à leur utilisation
- Le boom du gaz de schiste dirige l'innovation des renouvelables et du charbon vers les technologies de production du gaz
- Sur le long-terme, cela peut dérailler la transition d'une trajectoire de baisse des émissions vers une trajectoire en hausse.

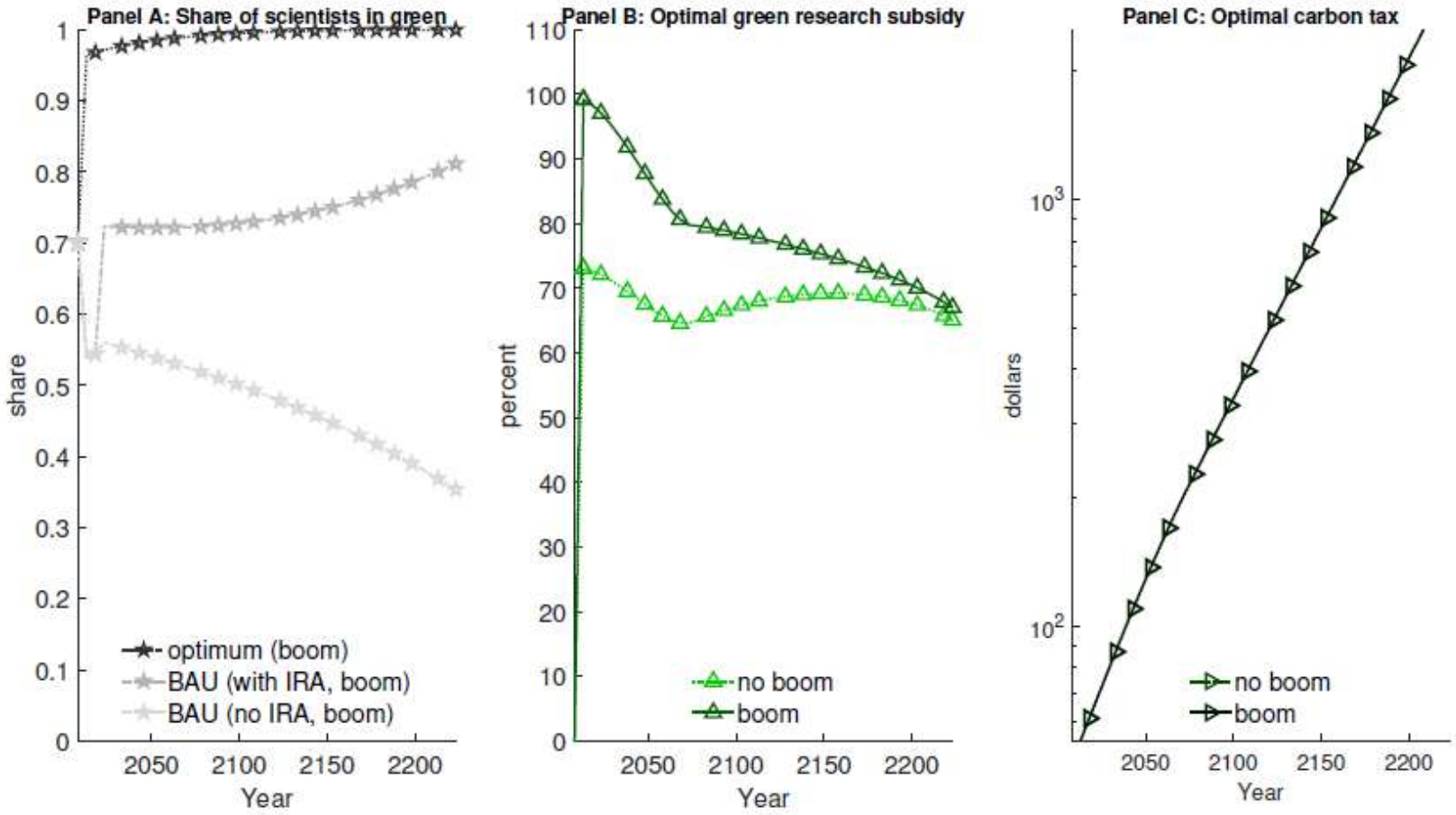


Politique industrielle (IRA)



COLLÈGE DE FRANCE 1530

Politique industrielle (IRA)



COLLÈGE DE FRANCE 1530