

Réchauffement climatique et transitions énergétiques : approches interdisciplinaires.

F. BOUCHET (ENS de Lyon - CNRS)

Cours Anthropocène – ENS de Lyon – Décembre 2018

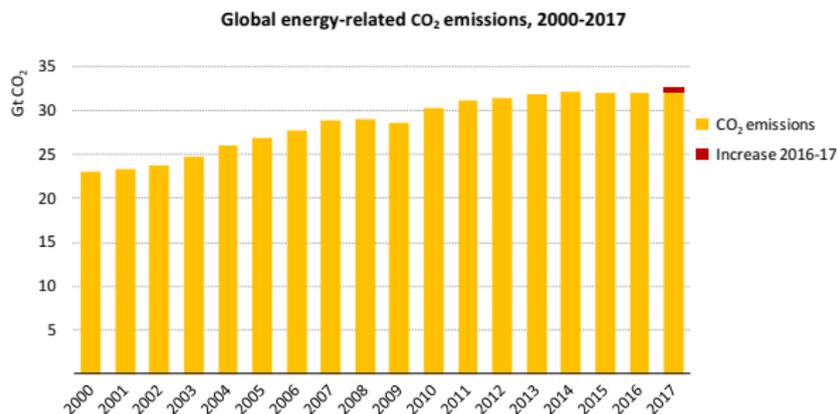
Plan de l'exposé

- 1 La stabilisation des émissions de CO₂ et la transition énergétique
 - Stabilisation des émissions de CO₂
 - La révolution d'une transition inéluctable vers les renouvelables
 - Emissions de CO₂ par région du monde, secteur économique et niveau de revenus
- 2 Quelle transition énergétique ?
 - Principes de la transition énergétique et responsabilités partagées
 - Transitions énergétiques, bifurcations et conséquences sociales
 - Les choix technologiques ne sont pas neutres, socialement et écologiquement

Outline

- 1 La stabilisation des émissions de CO₂ et la transition énergétique
 - Stabilisation des émissions de CO₂
 - La révolution d'une transition inéluctable vers les renouvelables
 - Emissions de CO₂ par région du monde, secteur économique et niveau de revenus
- 2 Quelle transition énergétique ?
 - Principes de la transition énergétique et responsabilités partagées
 - Transitions énergétiques, bifurcations et conséquences sociales
 - Les choix technologiques ne sont pas neutres, socialement et écologiquement

Les Emissions de CO₂ se Stabilisent



Emissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie (AIE)

- Qu'est ce qui explique ce changement positif (mais insuffisant) ?

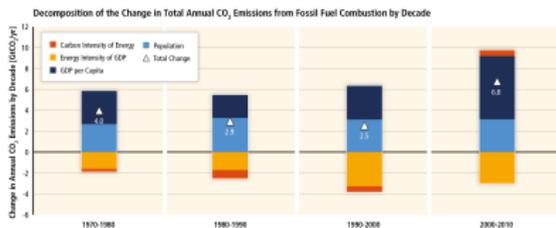
Equation de Kaya

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \frac{\text{Energy}}{\text{PIB}} \times \frac{CO_2}{\text{Energy}}.$$

- Facteurs d'évolution : Population (premier terme), croissance économique (second terme), intensité énergétique du PIB (sobriété et efficacité énergétique, type de développement) (troisième terme), intensité de la production d'énergie en gaz à effet de serre (quatrième terme). Qu'est ce qui explique ce changement récent positif (mais insuffisant) ?

Stabilisation du CO₂ sans Décroissance ?

Décomposition des variations des émissions de CO₂ par source

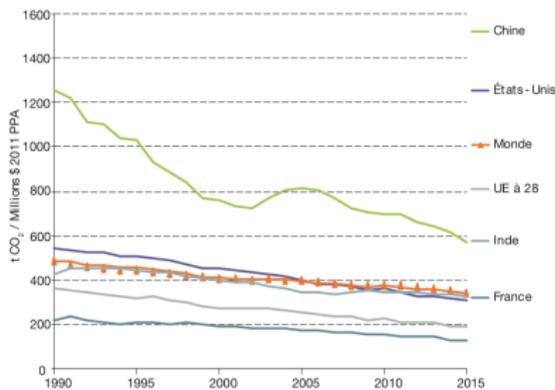


Dans les dernières décennies
(GIEC, AR5)

Pendant la période récente
(AIE)

- Depuis quelques années, les économies d'énergie et le changement des modes de production d'énergie compensent l'effet de la croissance sur les émissions de CO₂.

Emissions de CO₂ par Unité de PIB

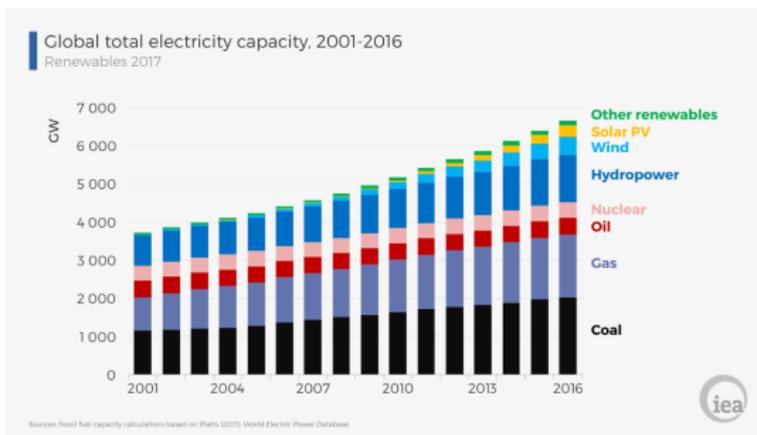


Sources : SDES d'après EDGAR, 2016 ; World Bank, 2017

Evolution des émissions mondiales de CO₂ par unité de PIB (EDGAR 2016)

- Des gains importants d'efficacité énergétique.

Production d'Electricité dans le Monde



Production mondiale d'électricité selon la source (AIE)

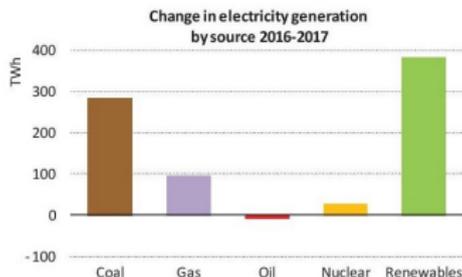
- Pourtant les énergies renouvelables ne représentent encore qu'un très faible pourcentage.

Outline

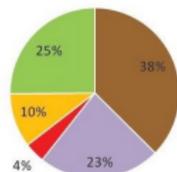
- 1 La stabilisation des émissions de CO₂ et la transition énergétique
 - Stabilisation des émissions de CO₂
 - La révolution d'une transition inéluctable vers les renouvelables
 - Emissions de CO₂ par région du monde, secteur économique et niveau de revenus
- 2 Quelle transition énergétique ?
 - Principes de la transition énergétique et responsabilités partagées
 - Transitions énergétiques, bifurcations et conséquences sociales
 - Les choix technologiques ne sont pas neutres, socialement et écologiquement

Les Energies Renouvelables Prennent le Pas sur les Fossiles

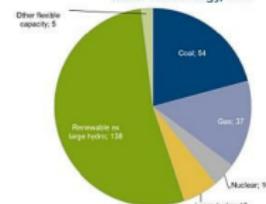
Nouvelles installations et variations de production d'électricité en 2016



Electricity generation in 2017:
25 570 TWh



Net power generating capacity added in 2016 by main technology, GW



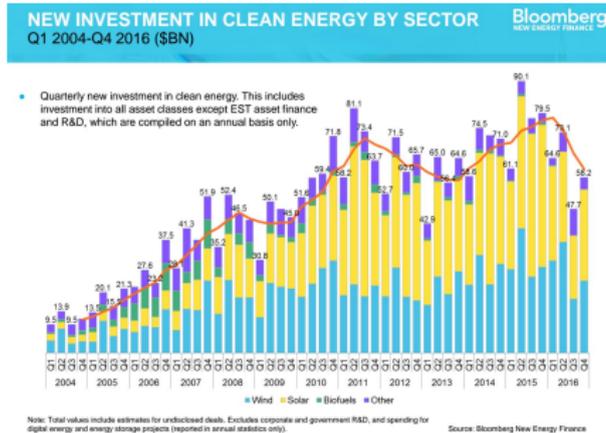
Source: Frankfurt School - UNEP Centre/BNEF, Global Trends in Renewable Energy Finance 2017.

Variation de production de 2016 à 2017 (AIE-2018)

Nouvelles capacités de production

- Les énergies renouvelables prennent irrémédiablement la place des sources de production fossiles, dans les nouvelles installations. Le nucléaire reste négligeable.

Des investissements dans les Energies Renouvelables Multipliés par 8 en 7 ans

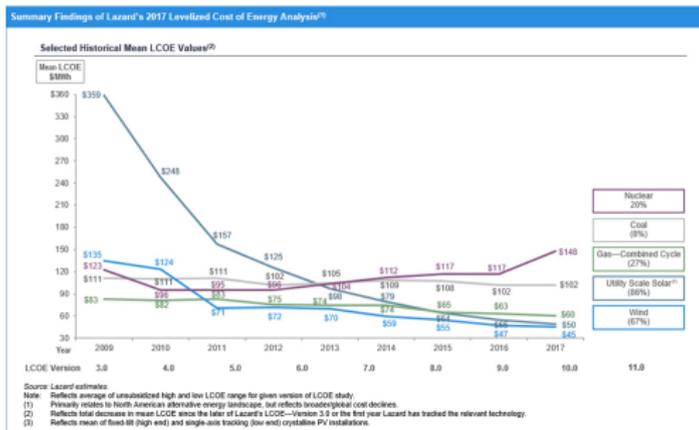


Investissements dans les énergies renouvelables (Bloomberg)

- De 2004 à 2011, les investissements dans les renouvelables ont été multipliés par 8. Pourquoi ?

Les Moins Chers : le Solaire Photovoltaïque et l'Eolien

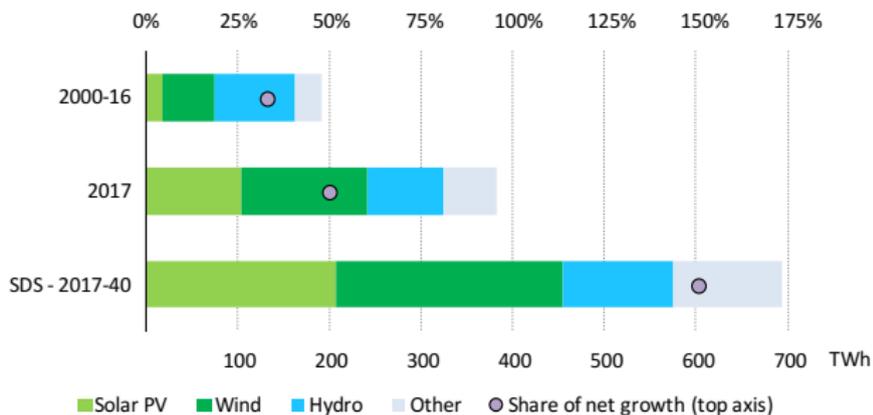
Coûts actualisés des production d'électricité (aux Etats Unis)



Evolution des coûts de production des l'électricité (Lazard, 2017)

- Les coûts du solaire ont été divisés par 2 tous les 3 ans.

L'Écllosion de la Revolution Renouvelable



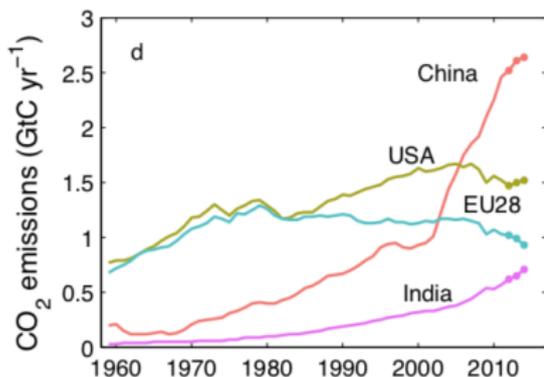
Croissance annuelle de la production d'électricité renouvelables par technologie (AIE-2018)

- Il faut cependant plusieurs décennies pour remplacer un parc de production électrique.

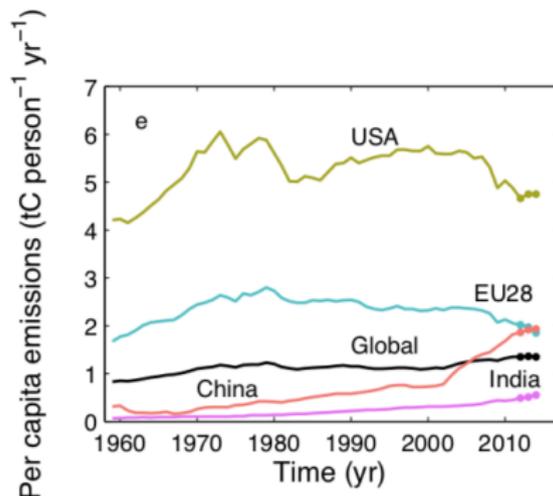
Outline

- 1 La stabilisation des émissions de CO₂ et la transition énergétique
 - Stabilisation des émissions de CO₂
 - La révolution d'une transition inéluctable vers les renouvelables
 - Emissions de CO₂ par région du monde, secteur économique et niveau de revenus
- 2 Quelle transition énergétique ?
 - Principes de la transition énergétique et responsabilités partagées
 - Transitions énergétiques, bifurcations et conséquences sociales
 - Les choix technologiques ne sont pas neutres, socialement et écologiquement

Emissions de CO₂ par Région



Emissions de CO₂ par région

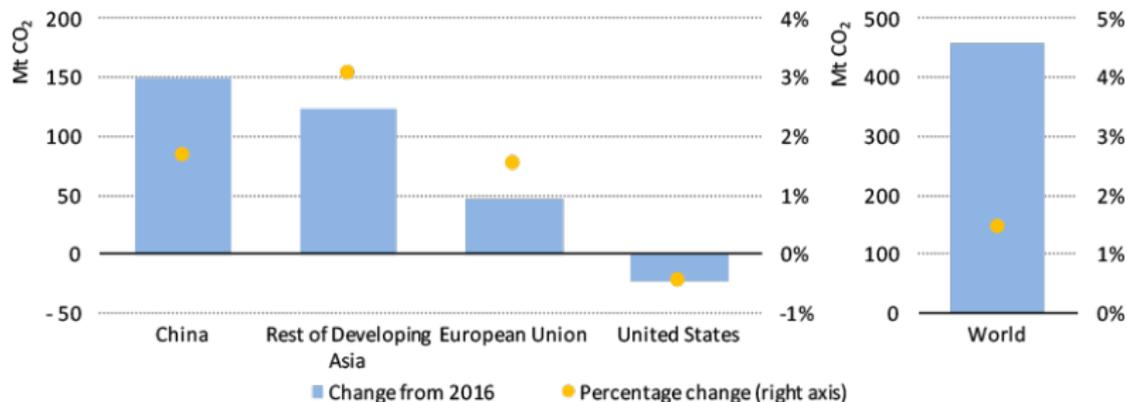


Emissions de CO₂ par habitant

(Le Querre et col., 2015)

Les Etats Unis font Décroître leurs Emissions de CO₂

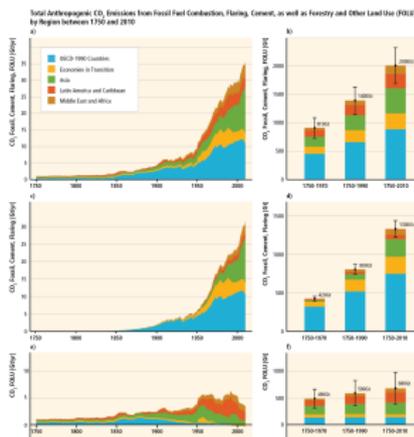
Les effets (temporaires) de la révolution du gaz aux Etats Unis



Variation des émissions de CO₂ par région du monde (IEA-2018)

Emissions de CO₂ par Région

Par région et par type de source (agricole y compris foresterie, ou fossile)

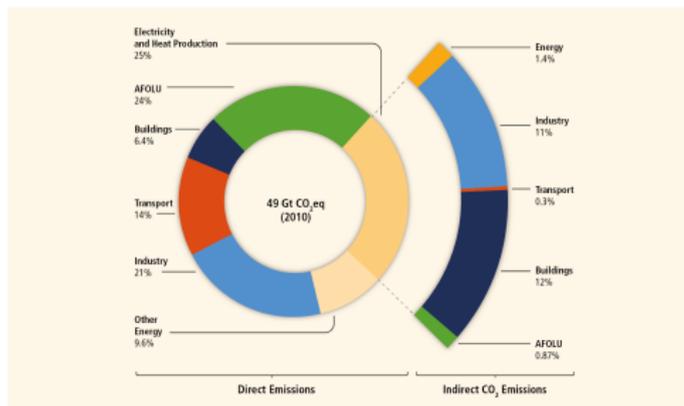


Sources historiques de CO₂ anthropiques (GIEC, AR5)

Emissions de CO₂ par Secteurs Economiques

Emissions de CO₂ globales

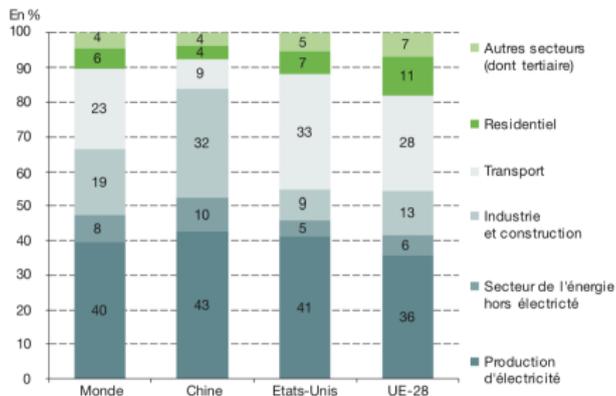
Greenhouse Gas Emissions by Economic Sectors



Emissions de CO₂ par secteurs économiques (GIEC, AR5)

Emissions de CO₂ par Secteurs Economiques et Régions

Emissions de CO₂ pour la production d'énergie

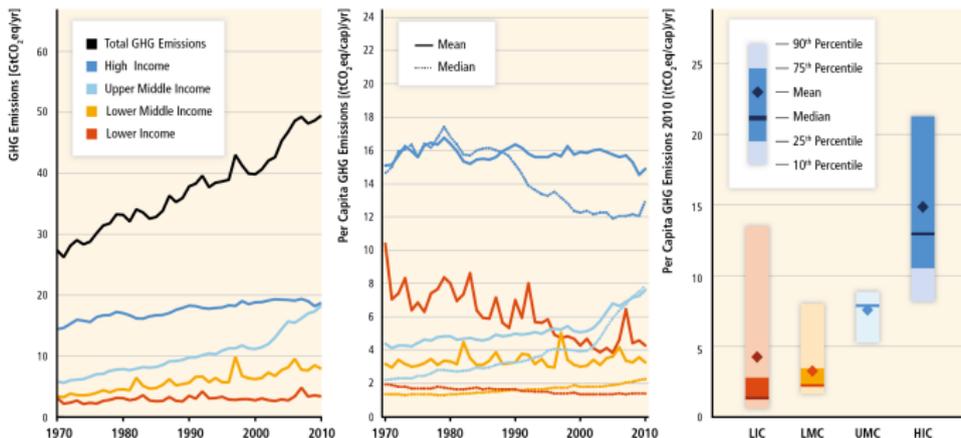


Source : AIE, 2016

Emissions de CO₂ pour la production d'énergie par région et secteur (AIE, 2016)

Emissions de CO₂ par Niveaux de Revenu

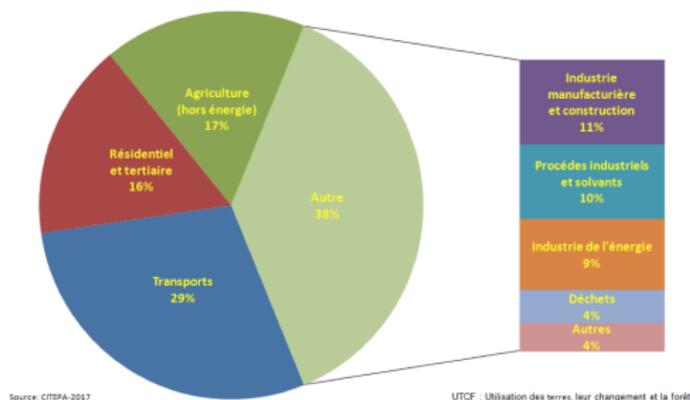
Emissions de CO₂ globales



Emissions de CO₂ par niveau de revenu (GIEC, AR5)

Emissions de GES par Secteurs en France

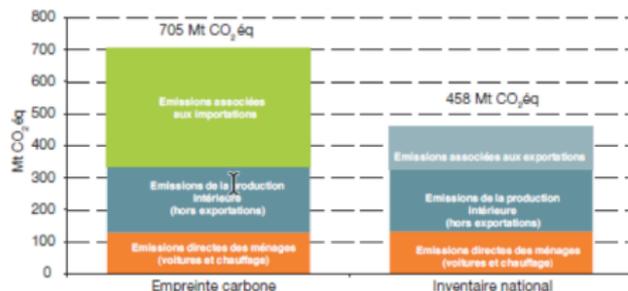
Hors UTCF (Usage des Terres, de leur Changement et de la Forêt)



Emissions de gaz à effet de serre en France en 2015 (CITEPA, 2017)

Empreinte Carbone et Emissions Nationales en France

COMPARAISON DE L'EMPREINTE CARBONE ET DE L'INVENTAIRE
EN FRANCE MÉTROPOLITAINE EN 2012



Note : l'empreinte et l'inventaire portent sur les trois principaux gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O).

Sources : SDES, 2017 d'après AIE, FAO, Citepa, Douanes, Eurostat, Insee

1/3 des émissions imputables aux français sont importées.

Outline

- 1 La stabilisation des émissions de CO₂ et la transition énergétique
 - Stabilisation des émissions de CO₂
 - La révolution d'une transition inéluctable vers les renouvelables
 - Emissions de CO₂ par région du monde, secteur économique et niveau de revenus
- 2 Quelle transition énergétique ?
 - Principes de la transition énergétique et responsabilités partagées
 - Transitions énergétiques, bifurcations et conséquences sociales
 - Les choix technologiques ne sont pas neutres, socialement et écologiquement

Principes de la Transition Énergétique

- Assurer un accès à chacun aux besoins énergétiques de base (alimentation, chauffage, mobilité) à un faible coût.
- Décarboner totalement la production d'énergie (objectif neutralité carbone en 2050).
- D'autres objectifs peuvent compléter ces objectifs fondamentaux : au delà des besoins des base, préférences de nature idéologique, souveraineté nationale, impacts sociaux, impacts économiques (emplois et croissance), etc.

Sobriété ou Technologie ? Bougie ou Destruction de la Planète ?

- Tous les scénarios de transition énergétique actuels, compatibles avec la neutralité carbone, nécessitent une diminution importante de consommation d'énergie.
- Dans tous les scénarios, la technologie joue un rôle fondamental.
- Les trois mots clés seront :
 - 1 Sobriété énergétique.
 - 2 Efficacité énergétique.
 - 3 Changement de technologies, d'usage, ou compensation des émissions.

Les Politiques ne Font Rien/L'Ecologie n'Intéresse Personne

Penser global, agir local

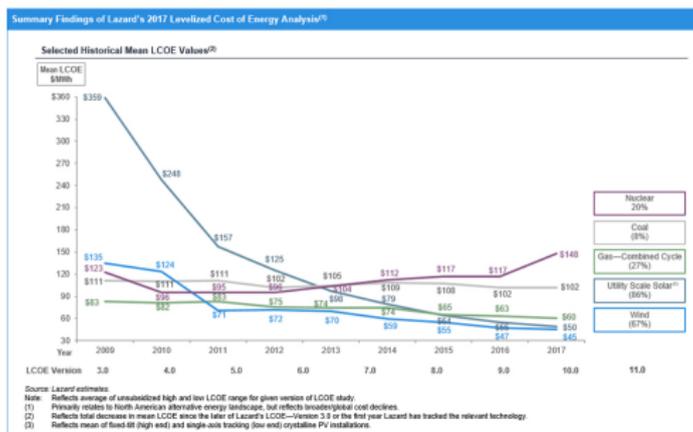
- **A chaque niveau politique ses responsabilités.**
- **Responsabilités globales** : coordonner les objectifs nationaux (installer une coopération pour éviter le phénomène du passager clandestin).
- **Responsabilités européennes** : pouvoir prescripteur de normes et d'objectifs partagés (tension intérêt collectif et intérêt individuels des états membres, économiques).
- **Responsabilités nationales** : mise en oeuvre des politiques énergétiques et de leur accompagnement social en fonction des spécificités nationales. Rôle prescriptif et réglementaire pour les collectivités territoriales, les entreprises et les citoyens.

Les Politiques ne Font Rien/L'Ecologie n'Intéresse Personne

Penser global, agir local

- A chaque niveau politique ses responsabilités.
- Responsabilités des collectivités territoriales : mise en oeuvre aux différents échelons.
- Responsabilités individuelles ou des entreprises : beaucoup de choix et de décisions sont prises in fine au niveau des consommateurs (individus ou entreprises) ou des choix de développement de technologies par les entreprises.

L'Exemple Européen des Politiques de Soutien aux Energies Renouvelables



Evolution des coûts de production des l'électricité (Lazard, 2017)

- Les coûts du solaire ont été divisés par 2 tous les 3 ans.
- Les politiques de l'Europe ont été le principal initiateur de la dynamique de réduction des coûts des renouvelables.

L'Exemple des Objectifs de la Communauté Européenne

Le cadre pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030 fixe trois grands objectifs pour 2030 :

- ➊ réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 % (par rapport aux niveaux de 1990) ;
- ➋ porter la part des énergies renouvelables à au moins 27 % ;
- ➌ améliorer l'efficacité énergétique d'au moins 27 %.

Selon la feuille de route de la Commission vers une économie à faible intensité de carbone :

- ➊ l'UE devrait réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 80 % d'ici à 2050 par rapport aux niveaux de 1990 ;
- ➋ les étapes pour y parvenir consistent à atteindre 60 % d'ici à 2040 ;

Un Exemple : la Mobilité

Tableau à double entrée : échelle d'action/responsabilité

- **Responsabilités à l'échelon européen.** Efficacité énergétique : norme de consommation des véhicules, taxation du transport aérien. **Changement de technologie** : coordination des politiques de R&D pour le transport électrique et de politiques nationales de soutien au transport électrique.
- **Responsabilités à l'échelon national.** Efficacité énergétique : mise en oeuvre des normes, politique de soutien (contrainte) aux véhicules qui émettent moins (plus) ou taxe carbone nationale. **Changement de technologie** : développement des transports collectifs à l'échelle nationale et des réseaux, cadre législatif pour les nouvelles mobilités, politiques de soutien au passage à l'électrique.

Un Exemple : la Mobilité

Tableau à double entrée : échelle d'action/responsabilité

- **Responsabilités à l'échelon des collectivités locales.** **Sobriété :** développement d'une urbanisation qui nécessite moins de transport. **Efficacité énergétique :** remplacement des véhicules des collectivités locales. **Changement de technologie :** développement des transports collectifs à l'échelle locales, des mobilités propres, des mobilités douces, accès à la prise au niveau de la collectivité.
- **Responsabilités à l'échelon des entreprises.** **Efficacité énergétique :** recherche et développement et commercialisation de véhicules moins émetteurs, développement de gammes de voitures moins grandes. **Changement de technologie :** recherche et développement et commercialisation de véhicules électriques moins chers, usage du gaz ou de l'hydrogène pour les transports lourds non électrifiables.

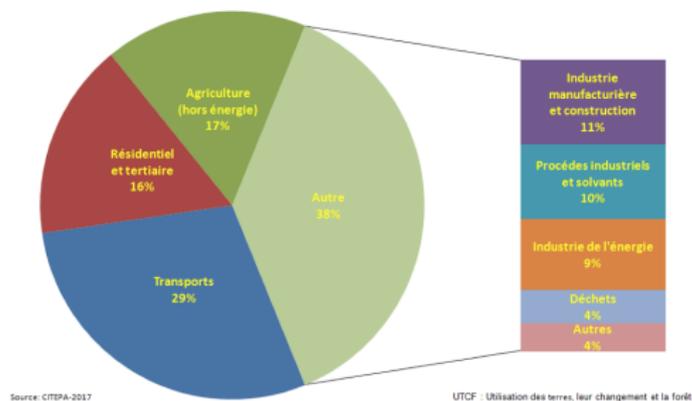
Un Exemple : la Mobilité

Tableau à double entrée : échelle d'action/responsabilité

- **Responsabilités individuelles.** **Sobriété** : j'annule un voyage non nécessaire, je voyage moins loin, j'habite plus proche de mon lieu de travail. **Efficacité énergétique** : j'achète une voiture plus petite qui consomme moins. **Changement de technologie** : je prends les transports en commun de préférence le train hors de ma ville, je passe à l'électrique.

Emissions de GES par Secteurs en France

Hors UTCF (Usage des Terres, de leur Changement et de la Forêt)



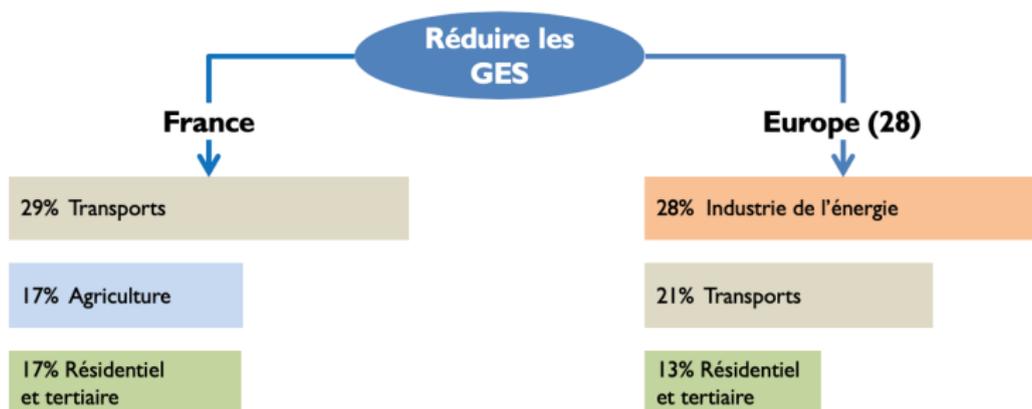
Emissions de gaz à effet de serre en France en 2015 (CITEPA, 2017)

Les Principales Sources de Réduction de GES en France

Il faut réduire les émissions dans tous les secteurs, mais certains auront plus d'impact

- Toujours donner la priorité à la sobriété et à l'efficacité :
l'énergie qui pollue le moins est celle qui n'est pas consommée.
- Ensuite, les deux priorités sont l'électrification des transports, et l'efficacité énergétique des bâtiments (isolation, pompes à chaleur, usage pertinent de l'électrique).
- Développement des sources de chaleur renouvelables (géothermie, bois, méthanisation).
- La réduction des GES d'origine agricole jouera un rôle essentiel.

Principaux Secteurs d'Emissions de *GES* en France et en Europe



Les priorités européennes ne sont pas nécessairement les priorités françaises.

Outline

- 1 La stabilisation des émissions de CO₂ et la transition énergétique
 - Stabilisation des émissions de CO₂
 - La révolution d'une transition inéluctable vers les renouvelables
 - Emissions de CO₂ par région du monde, secteur économique et niveau de revenus
- 2 **Quelle transition énergétique ?**
 - Principes de la transition énergétique et responsabilités partagées
 - **Transitions énergétiques, bifurcations et conséquences sociales**
 - Les choix technologiques ne sont pas neutres, socialement et écologiquement

5ème Avenue, New York, en 1900

Easter morning 1900: 5th Ave, New York City. Spot the automobile.



Source: US National Archives.

5ème Avenue, New York, en 1913

**Easter morning 1913: 5th Ave, New York City.
Spot the horse.**

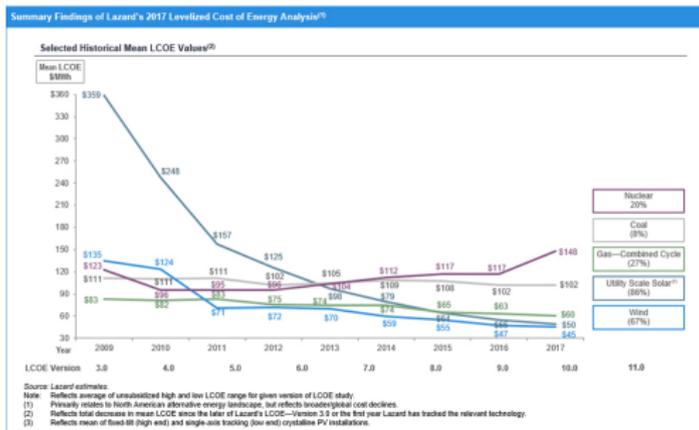


Source: George Grantham Bain Collection.

Les bifurcations que nous nous apprêtons à vivre seront aussi rapides que les transitions du passé, mais probablement plus profondes.

Les Moins Chers : le Solaire Photovoltaïque et l'Eolien

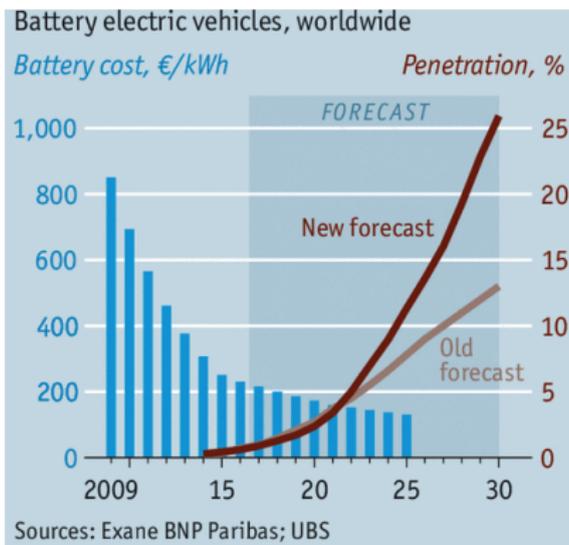
Coûts actualisés des production d'électricité (aux Etats Unis)



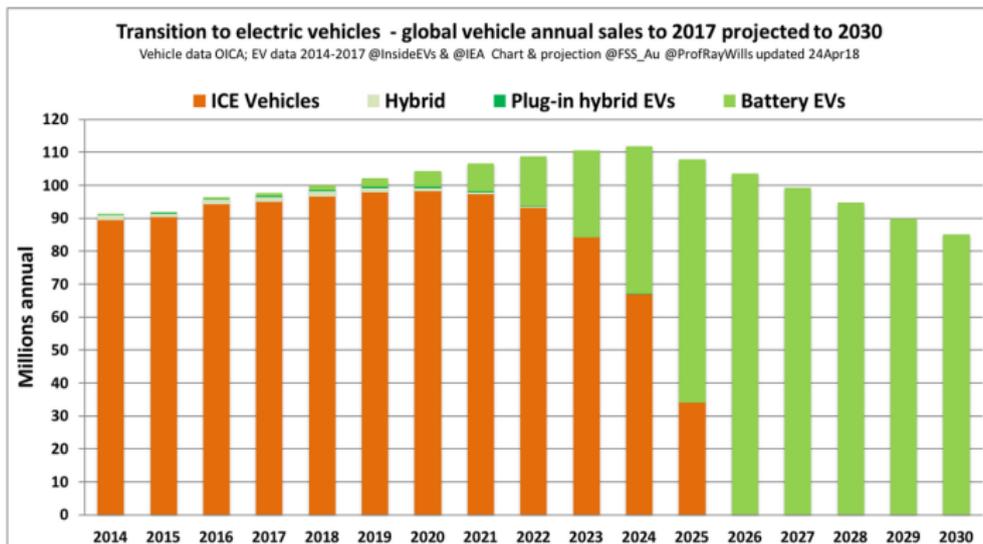
Evolution des coûts de production des l'électricité (Lazard, 2017)

- Les coûts du solaire ont été divisés par 2 tous les 3 ans.

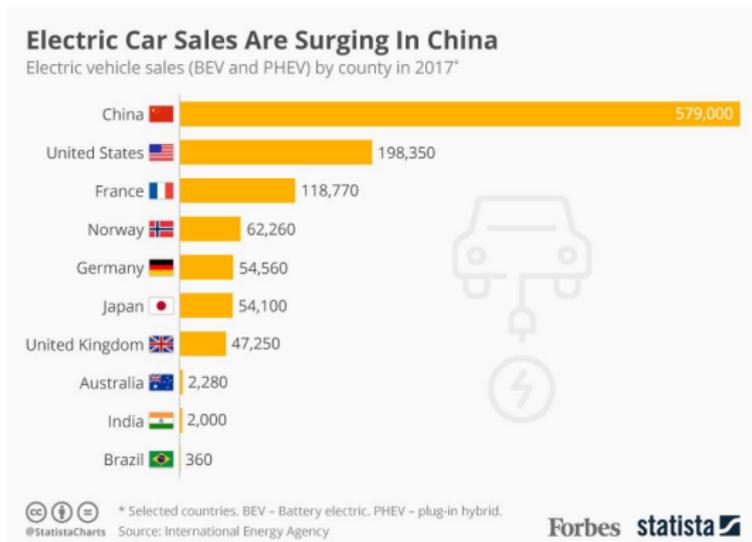
La Bifurcation Vers Les Voitures Electriques et Le Prix des Batteries



La Bifurcation vers Les Voitures Electriques



La Bifurcation vers Les Voitures Electriques



La Sobriété et l'Efficacité : L'Autre Volet de la Révolution de l'Electromobilité

- Autopartage.
- Covoiturage.
- Véhicules électriques utilisés pour le stockage d'électricité au profit des réseaux électriques.
- Un point à surveiller : le prix de l'énergie devenant beaucoup moins important, il existe un risque que la quantité d'énergie totale utilisée et la quantité de transport augmentent avec le développement des véhicules électriques.

Transition Énergétique et Futures Bifurcations

- Première bifurcation : solaire et éolien.
- Des défis à relever : stockage de l'électricité, ajustement des marchés, etc.
- Seconde bifurcation : électrification du transport.
- Des défis à relever : nouvelles industries, vitesse de déploiement des batteries et des infrastructures nécessaires, etc.
- Troisième bifurcation : stockage saisonnier, économie de l'hydrogène ou du méthane ?
- Dans tous les cas, la priorité doit être donnée à la sobriété et à l'efficacité énergétique.

Conséquences Sociales De Ces Bifurcations

- Election de Trump, image du travailleur du mid-west américain, et Tea Party (mouvement anti-taxes et anti-élites).
- Blocage politique en Allemagne pour la fermeture des centrales à charbon.
- Le problème de la sortie future du charbon en Inde.
- Bolsonaro et l'exploitation de l'Amazonie.
- Les bonnets rouges ou les gilets jaunes en France.
- A venir en France : fermeture progressive des centrales nucléaires, transformation de l'industrie de l'automobile, les emplois de la transition énergétique, etc.

Outline

- 1 La stabilisation des émissions de CO₂ et la transition énergétique
 - Stabilisation des émissions de CO₂
 - La révolution d'une transition inéluctable vers les renouvelables
 - Emissions de CO₂ par région du monde, secteur économique et niveau de revenus
- 2 **Quelle transition énergétique ?**
 - Principes de la transition énergétique et responsabilités partagées
 - Transitions énergétiques, bifurcations et conséquences sociales
 - **Les choix technologiques ne sont pas neutres, socialement et écologiquement**

Energie Solaire Photovoltaïque



Pétrole et Charbon

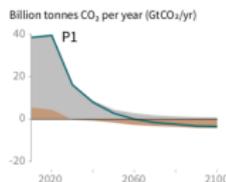


4 Scénario Énergétiques du GIEC

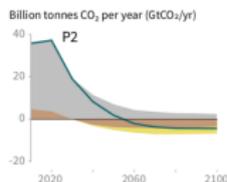
Lien entre réduction de la consommation d'énergie et technologies nécessaires

Breakdown of contributions to global net CO₂ emissions in four illustrative model pathways

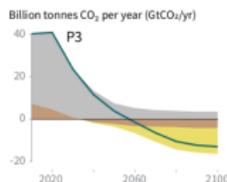
● Fossil fuel and industry ● AFOLU ● BECCS



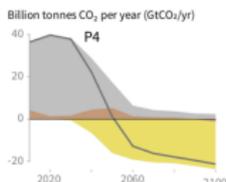
P1: A scenario in which social, business, and technological innovations result in lower energy demand up to 2050 while living standards rise, especially in the global South. A down-sized energy system enables rapid decarbonization of energy supply. Afforestation is the only CDR option considered; neither fossil fuels with CCS nor BECCS are used.



P2: A scenario with a broad focus on sustainability including energy intensity, human development, economic convergence and international cooperation, as well as shifts towards sustainable and healthy consumption patterns, low-carbon technology innovation, and well-managed land systems with limited societal acceptability for BECCS.



P3: A middle-of-the-road scenario in which societal as well as technological development follows historical patterns. Emissions reductions are mainly achieved by changing the way in which energy and products are produced, and to a lesser degree by reductions in demand.



P4: A resource and energy-intensive scenario in which economic growth and globalization lead to widespread adoption of greenhouse-gas intensive lifestyles, including high demand for transportation fuels and livestock products. Emissions reductions are mainly achieved through technological means, making strong use of CDR through the deployment of BECCS.

4 scénario représentatifs du GIEC (GIEC, SP15-2018)

BECCS : Bioénergie avec Capture du Carbone et Stockage - AFOLU : Agriculture, Foresterie et Autres

Usages des Terres.

- Sans réduction de la consommation d'énergie, il est nécessaire de recourir à des techniques qui sont problématiques du point de vue des objectifs de développement durable

4 Scénario Énergétiques du GIEC

Lien entre réduction de la consommation d'énergie et technologies nécessaires

Global indicators	dès aujourd'hui pour profiter de 1 To (1...)				
	P1	P2	P3	High overshoot	No or low overshoot
Pathway classification	No or low overshoot	No or low overshoot	No or low overshoot	High overshoot	No or low overshoot
CO ₂ emissions change in 2030 (% rel to 2010)	-58	-47	-41	4	(-59,-40)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	-93	-95	-91	-97	(-104,-91)
Ayoto-GHG emissions* in 2030 (% rel to 2010)	-50	-49	-35	-2	(-55,-38)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	-82	-89	-78	-80	(-93,-81)
Final energy demand** in 2030 (% rel to 2010)	-15	-5	17	39	(-12,7)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	-32	2	21	44	(-11,22)
Renewable share in electricity in 2030 (%)	60	58	48	25	(47,65)
↳ in 2050 (%)	77	81	63	70	(69,87)
Primary energy from coal in 2030 (% rel to 2010)	-78	-61	-75	-59	(-78,-59)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	-97	-77	-73	-97	(-95,-74)
from oil in 2030 (% rel to 2010)	-37	-13	3	86	(-34,3)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	-87	-50	-81	32	(-76,31)
from gas in 2030 (% rel to 2010)	-25	-20	33	37	(-26,21)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	-74	-53	21	-48	(-56,6)
from nuclear in 2030 (% rel to 2010)	59	83	98	106	(44,102)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	150	98	501	468	(91,190)
from biomass in 2030 (% rel to 2010)	-11	0	36	-1	(29,80)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	-16	49	121	418	(123,261)
from non-biomass renewables in 2030 (% rel to 2010)	430	470	315	110	(243,438)
↳ in 2050 (% rel to 2010)	832	1327	878	1137	(575,1300)
Cumulative CCS until 2100 (GtCO ₂)	0	348	687	1218	(550,1017)
↳ of which BECCS (GtCO ₂)	0	151	414	1191	(364,662)
Land area of bioenergy crops in 2050 (million hectares)	22	93	283	724	(151,329)
Agricultural CH ₄ emissions in 2030 (% rel to 2010)	-24	-48	1	14	(-30,-11)
in 2050 (% rel to 2010)	-33	-69	-23	2	(-46,-23)
Agricultural N ₂ O emissions in 2030 (% rel to 2010)	5	-26	15	3	(-21,4)
in 2050 (% rel to 2010)	6	-26	0	39	(-26,1)

NOTE: Indicators have been selected to show global trends identified by the Chapter 2 assessment. National and sectoral characteristics can differ substantially from the global trends shown above.

*Ayoto-gas emissions are based on SAR GNP-100

** Changes in energy demand are associated with improvements in energy efficiency and behaviour change

Impact des Choix Technologiques

- Les options technologiques nécessaires pour permettre d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de dioxyde de carbone seront fortement affectées par les choix individuels et collectifs.
- Le développement des pays les plus pauvres et les aspects sociaux de la transition dans les pays développés seront aussi affectés par les choix technologiques et les choix politiques dans la mise en oeuvre de la transition.
- Les politiques de sobriété et d'efficacité énergétique sont en général à souhaiter, mais elles nécessitent des changements de comportement des citoyens.

Conclusions

- Nous avons tous les outils nécessaires pour changer fondamentalement notre façon de produire l'énergie et pour ne plus émettre de CO₂ d'ici à quelques décennies.
- Cette transition impliquera des changements profonds de nos sociétés, qui sont autant de défis à relever.
- Ces changements sont des opportunités potentielles pour construire de nouvelles organisations plus justes, plus respectueuses de l'environnement en général, et favorables à un développement de nos sociétés.
- Des millions de personnes sont engagées dans ces transitions depuis des années, et malgré les défis à venir, nous avons toutes les raisons d'être optimistes.