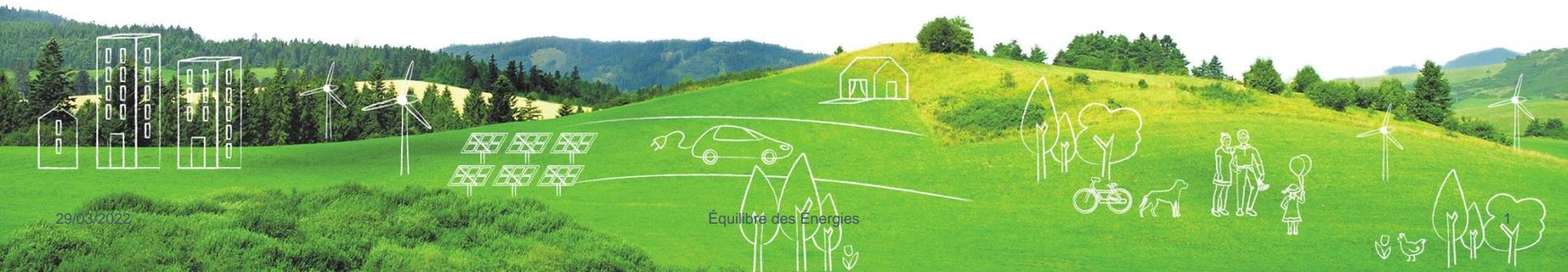


F2S – Science et Progrès – 24 mars 2022

La neutralité carbone : une affaire de thermodynamique, mais pas seulement...

Jean-Pierre Hauet

Président du Comité scientifique d'Équilibre des Énergies



Economies d'énergie et décarbonation : deux objectifs qui doivent aujourd'hui coexister (1)

● Les économies d'énergie

- ➔ Le premier choc pétrolier a vu le prix du pétrole passer en une nuit (17 octobre 1973) de 2,3 à 10 \$/baril avec menace d'embargo lié à la (guerre du Kippour)
- ➔ Le deuxième choc pétrolier, lié à la révolution en Iran et à la guerre Iran/Irak, a fait passer en 1979 le prix du baril de 13 \$ à 40 \$
- ➔ Après chacun de ces chocs pétroliers, les pays consommateurs ont cherché prioritairement à faire des économies d'énergie
- ➔ En France, création de l'Agence pour les économies d'énergie (septembre 1974)
- ➔ Depuis, bientôt 50 ans, la France vit « dans la religion » des économies d'énergie
- ➔ La guerre d'Ukraine en renforce l'actualité

Deux objectifs qui doivent aujourd'hui coexister (2)

● La lutte contre le changement climatique

- ➔ A partir de 1988, le monde a pris conscience de la nécessité d'endiguer les effets des émissions de gaz à effet de serre sur le climat : décision du G7, création du GIEC
- ➔ Les rapports se sont succédé, ponctués par le protocole de Kyoto (1995) puis l'accord de Paris (2015)
- ➔ L'accord de Paris fixe un objectif d'élévation de température à ne pas dépasser par rapport au niveau préindustriel (+ 2 °C et de préférence + 1,5 °C)
- ➔ Les pays doivent en conséquence parvenir à un monde climatiquement neutre dans la seconde moitié du XXI^e siècle
- ➔ Le GIEC a quantifié cet objectif en termes de quantités de gaz à effet de serre qu'il reste possible d'émettre avant d'atteindre la neutralité climatique (notion de budget d'émission)

La question énergétique est une question d'indépendance plus que d'épuisement des ressources

- Sur le court terme, la question d'accès à l'énergie peut à tout moment devenir très prégnante. L'affaire ukrainienne le montre.
- Sur le long terme, la question énergétique soulève celle de l'épuisement des ressources mais celui-ci se trouve repoussé depuis des décennies du fait de la mise en exploitation de nouveaux gisements
- « *L'âge de pierre ne s'est pas terminé faute de pierres* »
(Cheikh Ahmed Zaki Yamani)



Pétrole : 53 ans de réserves –
Source : Statistiques BP



Gaz : 48,8 ans de réserves – Source :
Statistiques BP



Charbon : 139 ans de réserves –
Source : Statistiques BP



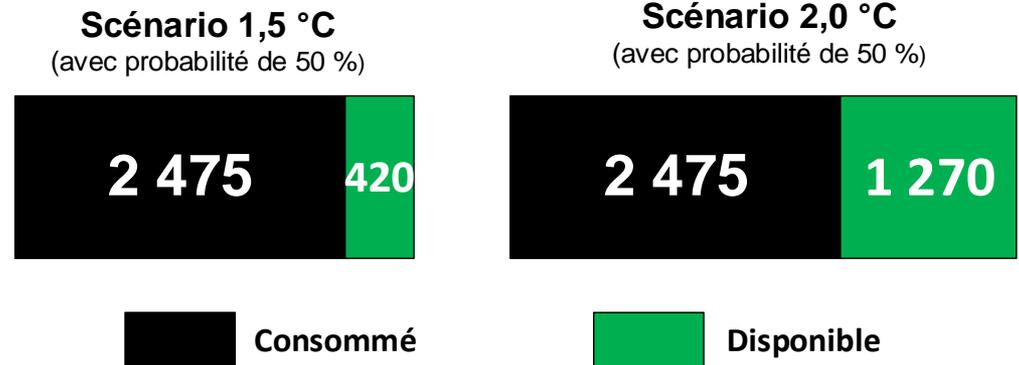
Uranium : 100 ans de réserves (à
moins de 130 \$/kg) – Source : AIEA

et après les réserves restent les ressources...

La question climatique : un problème d'épuisement à court terme

- La question climatique est aussi une question d'épuisement d'une ressource naturelle : l'aptitude du milieu naturel à absorber les émissions de GES d'origine anthropique
- Selon le GIEC, cette ressource est en voie d'épuisement rapide
- Le GIEC invite à raisonner en budget restant disponible jusqu'à l'atteinte de la neutralité carbone
- La répartition éventuelle de ce budget entre pays pose à l'évidence des problèmes d'équité et d'éthique
- Quelles que soient les scénarios, les défis sont considérables

Budgets carbone restant disponibles (Gt CO₂)



Nota : compte non tenu des récupérations possibles du CO₂ dans l'atmosphère par capture directe ou BECCS

- ➔ Si le budget restant disponible était réparti au prorata des populations, le scénario 1,5 °C accorderait à la France un budget de 3,47 Gt de CO₂ soit 10 années d'émissions au rythme actuel
- ➔ Le scénario 2 °C lui accorderait un budget de 10,5 Gt de CO₂ soit 29 années d'émission au rythme actuel



La contrainte climatique devrait s'imposer mais l'objectif d'économies d'énergie reste considéré comme primordial

- Depuis les politiques publiques donnent la priorité aux économies d'énergie, voire à la réduction des consommations : principe « Energy Efficiency First » de la Commission européenne
- Les économies d'énergie contribuent à la décarbonation et sont, pour beaucoup d'entre elles, mobilisables à court terme
- Toutefois, dans une optique de décarbonation profonde (neutralité climatique), il existe des rapports complexes entre économies d'énergie et décarbonation
- Plusieurs questions :
 - ➔ Economies d'énergie : de quoi parle-t-on ? La notion est-elle clairement définie ?
 - ➔ Jusqu'où peuvent aller les économies d'énergie ?
 - ➔ Economies d'énergie et décarbonation vont-elles toujours de pair?

Les économies d'énergie : une notion intuitive mais complexe

- Economies d'énergie
 - Chasse au « gaspi »
 - Utilisation rationnelle de l'énergie
 - Maîtrise de l'énergie
 - Efficacité énergétique
 - Amélioration de la performance énergétique
 - Frugalité, sobriété...
- Cependant plusieurs notions se recouvrent et les liens avec l'objectif de décarbonation ne sont pas simples.



Les économies d'énergie : une notion polysémique

- **Aujourd'hui, le maître mot est la sobriété**
- Mais jusqu'où la sobriété ? Privations, rationnement, décroissance...
- La sobriété n'est pas l'efficacité énergétique (*minimisation de la consommation énergétique d'un système pour un service rendu donné*)
- La lutte contre les gaspillages est-elle de la sobriété ou de l'efficacité ?
- Efficacité énergétique et réduction des consommations en valeur absolue sont souvent confondues → croyance en la décorrélation entre croissance économique et consommation d'énergie
- La notation de Kaya permet de clarifier certains points

L'équation de Kaya (1993)

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \times \frac{E}{PIB} \times \frac{PIB}{Pop} \times Pop$$

*Emissions de CO₂
en Gt de CO₂*

- Décarbonation de la société

*Intensité carbone
en Mt de CO₂/EJ*

- Recours à des filières énergétiques neutres en carbone

*Intensité énergétique
en EJ/Mrd € de PIB*

- Lutte contre les gaspillages
- Recyclage
- Efficacité énergétique
 - Réduction des pertes (1^{er} principe)
 - Amélioration des rendements (2^e principe)

*PIB par habitant
en €/habitant*

- Sobriété
- Privations
- Rationnement
- Décroissance

*Population
en habitants*

- Une donnée à court et moyen terme



Décarbonation de l'énergie



Economies d'énergie



Les économies d'énergie : une notion *systemique* (1)

Ne pas définir clairement le système de référence conduit à des erreurs de raisonnement et à une surestimation des économies d'énergie

● Cas 1

Soit une maison chauffée au fuel consommant 10 000 kWh/an de chauffage

➔ Scénario 1 : on améliore fortement l'isolation

Economie 40 % soit 4 000 kWh

➔ Scénario 2 : on installe une pompe à chaleur

Economie 70 % soit 7 000 kWh

➔ Scénario 3 : on fait les deux mais, à l'évidence, l'économie ne sera pas la somme des deux.



Les économies d'énergie ne sont pas additives, Pourtant, on fixe des objectifs d'économie d'énergie en valeur absolue et on émet des certificats d'économie d'énergie pour chacune des actions prises séparément alors que leur intérêt marginal va en décroissant



Les économies d'énergie : une notion *systemique* (2)

- Cas 2

Un data center rejette une certaine quantité de chaleur. On décide d'utiliser cette chaleur pour chauffer un ensemble de logements à proximité.

On réalise ainsi une certaine économie d'énergie mais ni le data center, ni les logements ont vu leur performance énergétique s'améliorer. Qui doit être crédité de l'économie réalisée ?

- Cas 3

Deux communautés sont reliées par un moyen de transport. On améliore l'efficacité énergétique de ce moyen. Quelle communauté doit être créditée de l'économie correspondante ?

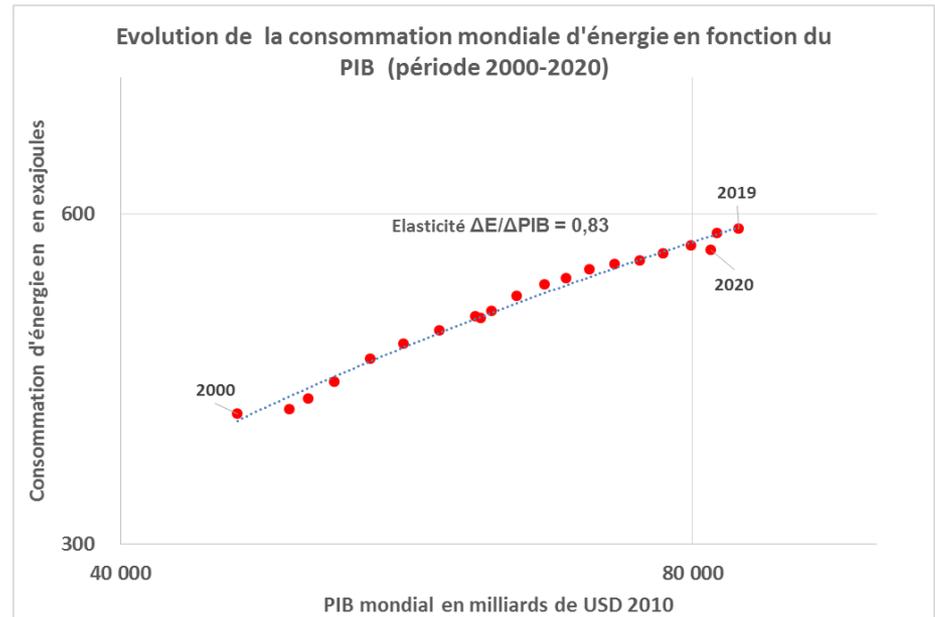
- Cas 4

Une activité industrielle fortement consommatrice est délocalisée dans un pays tiers. Le pays qui délocalise voit ses consommations baisser sans aucun effort d'efficacité. Faut-il comptabiliser l'économie correspondante ?

- Nota : la même problématique, avec le risque de double compte, se retrouve dans le décompte des émissions de CO₂

Les économies d'énergie ont des limites

- Activité économique et bien-être des populations nécessitent de l'énergie : la décorrélation entre croissance économique et consommation d'énergie relève de phénomènes transitoires (progrès technique, soubresauts économiques et, au niveau d'un système donné, délocalisation d'activités fortement consommatrices)
- Historiquement, il y a toujours eu une forte corrélation entre croissance du PIB et consommation d'énergie
- Mais :
 - ➔ L'élasticité moyenne Energie/PIB était de 0,68 sur 1980/2000
 - ➔ Elle est de 0,83 sur 2000/2020
 - effet de l'évolution des prix ?
 - du relâchement des comportements
 - du différentiel de croissance entre pays ?
 - de la difficulté croissante à réaliser des économies d'énergie ?

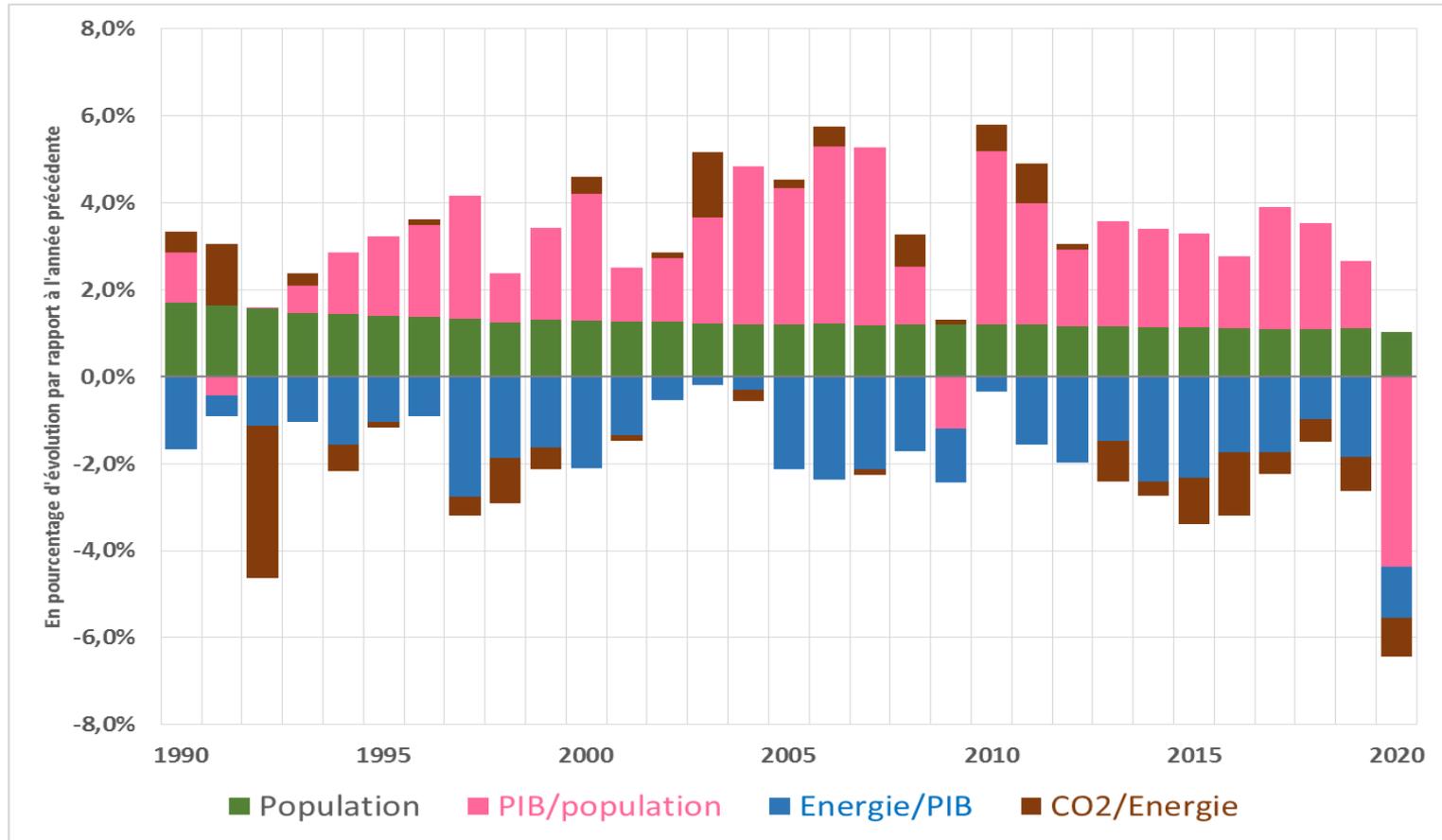


Jusqu'où les économies d'énergie ?

- Le code de l'énergie prévoit une réduction de la consommation finale d'énergie de 50 % en valeur absolue en 2050 par rapport à 2012
- Le nouveau projet de directive européenne sur l'efficacité énergétique prévoit, de façon indéfinie, une réduction des consommations finales d'énergie de 1,5 % par an
- Est-ce atteignable ?
 - ➔ Effet rebond
 - ➔ Effet de la croissance économique et de la réinitialisation souhaitée
 - ➔ Certains experts estiment qu'il sera difficile de ramener l'intensité énergétique à moins de 0,6 kWh/\$ (on est actuellement en France à moins de 1 kWh – Certaines économies sont encore à 5 kWh/\$) (Philippe Charlez 2022)
- La décarbonation implique donc de recourir davantage aux filières énergétiques neutres en carbone : électricité bas-carbone, hydrogène bas carbone, gaz renouvelables, carburants de synthèse et carburants durables pour l'aviation, déchets renouvelables, chaleurs renouvelables

La migration vers des filières décarbonées, une voie encore peu exploitée

- Dans la décomposition de Kaya, la migration vers les énergies décarbonées pèse encore très peu dans l'évolution mondiale des émissions de CO₂

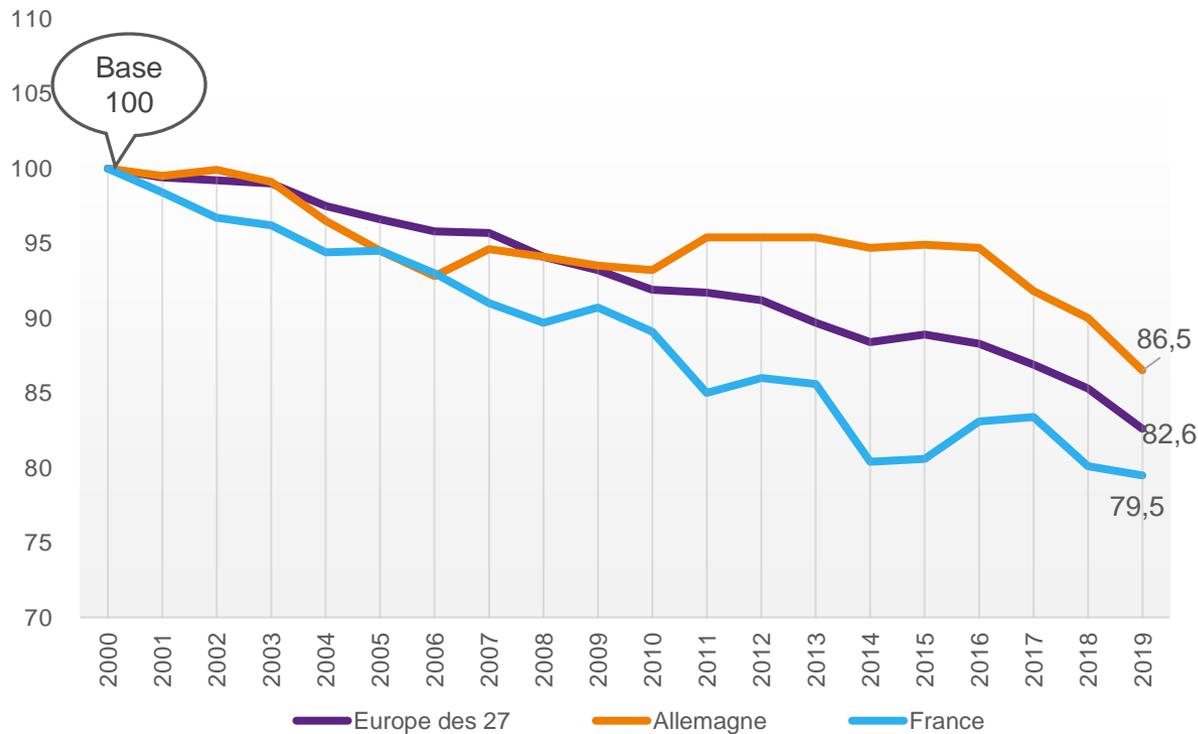


Source: d'après Friedlingstein et al 2021



En Europe, la décarbonation de l'énergie consommée n'est pas très avancée

- 18 pts gagnés en Europe en 19 ans, 20 pts en France, 13,5 en Allemagne



Source : Eurostat

Politiques de décarbonation et d'économies d'énergies doivent être coordonnées

- En règle générale, les économies d'énergie concourent à la décarbonation : *moins on consomme, moins on émet...*
- Cependant :
 - ➔ La façon dont sont décomptées les économies d'énergie peut avoir un effet négatif sur les émissions de CO₂
 - ➔ Le passage à des procédés moins carbonés peut entraîner des consommations accrues d'énergie
 - ➔ La décarbonation profonde va nécessiter beaucoup d'énergie



Le problème de l'agrégation des formes d'énergie

- Les comptabilités énergétiques se font encore en énergie primaire, avec des facteurs de conversion conventionnels
 - ➔ Pour l'électricité d'origine nucléaire, le facteur est de 3 car on tient compte du rendement thermodynamique de la conversion de la chaleur d'origine nucléaire en électricité (33 %)
 - ➔ Pour l'électricité d'origine renouvelable, le facteur de 1 car on ne tient pas compte du rendement des panneaux solaires (13 à 20 %) ou des éoliennes (20 à 35 %)
 - ➔ Au final, les consommations d'électricité sont affectées d'un coefficient multiplicateur de 2,3 en France, ce qui pénalise l'électricité dans les bilans énergétiques alors que l'électricité est très largement décarbonée en France
 - ➔ La même démarche risque de s'appliquer à l'hydrogène électrolytique
 - ➔ La comptabilité de l'énergie et la recherche d'économies en énergie primaire vont à l'opposé de la décarbonation

Quelques exemples de distorsion liée à la conversion en énergie primaire

Chauffage d'un logement	Consommation en énergie finale	Consommation en énergie primaire	Emissions de CO ₂
Gaz	10 000 kWh	10 000 kWh	2,27 t
Electricité Joule	10 000 kWh	23 000 kWh	0,79 t

Véhicule particulier (12 000 km/an)	Consommation en énergie finale	Consommation en énergie primaire	Emissions de CO ₂
Essence	660 litres	5 610 kWh	1,80 t
Electricité	2 400 kWh	5 520 kWh	0,33 t

Poids lourd (100 000 km/an)	Consommation en énergie finale	Consommation en énergie primaire	Emissions de CO ₂
Gazole	33 000 litres	302 280 kWh	91,6 t
Electrique batterie	165 000 kWh	379 500 kWh	9,9 t
Electrique hydrogène	8 000 kg H ₂	934 000 kWh	24,36 t



La neutralité climatique ne sera atteinte qu'au prix de consommations d'énergie accrues (1)

- Certains effets sont relativement marginaux :
 - ➔ Le développement du biogaz entraîne des émissions accrues de méthane
 - ➔ Le développement des pompes à chaleur peut entraîner de émissions de fluides frigorigènes (HFC)
 - ➔ Les pots catalytiques réduisent les émissions d'oxydes d'azote par diminuent le rendement des moteurs
 - ➔ L'augmentation de la température de sortie dans les réacteurs améliore leur rendement mais génère des oxydes d'azote
 - ➔ Etc.
- La décarbonation profonde nécessite de faire appel à des procédés industriels qui peuvent être fortement consommateurs en énergie
 - ➔ La filière hydrogène électrolytique implique de faire appel à des électrolyseurs (rendement ~60 %) et à des piles à combustible (rendement ~55 %)
 - ➔ Le captage et le stockage du Carbone (CCS) diminue les rendements de façon très importante. Plus de 10 pts dans le cas de la production d'électricité
 - ➔ La décarbonation du secteur aérien implique de faire appel à l'hydrogène ou aux SAF (Sustainable Aviation Fuels)
- Ces procédés vont nécessiter des équipements qu'il faudra fabriquer

La neutralité climatique ne sera atteinte qu'au prix de consommations d'énergie accrues (2)

Les carburants de substitution dans l'aviation

	Emissions CO ₂		Energie nécessaire	
	Gt de CO ₂	Variation	En EJ	Variation
Situation 2018	1,2	-	14,1	-
Scénario tout hydrogène (avec électricité bas-carbone)	0,1	-89 %	24,6	+74 %
Scénario SAF HEFA huile de palme ¹	0,5 à 1,5	-61 à +18 %	23,7	+68 %
Scénario SAF Fischer Tropsch sur résidus forestiers	0,1 à 0,4	-89 à 71%	50,4	+257 %

(1) : HEFA = Hydroprocessed esters and fatty acids

Source : Référentiel ISAE-SUPAREO

- La fabrication de SAF à partir de CO₂ récupéré directement dans l'atmosphère nécessitera encore plus d'énergie
- Et n'oublions pas le contenu énergétique des équipements qui seront nécessaires



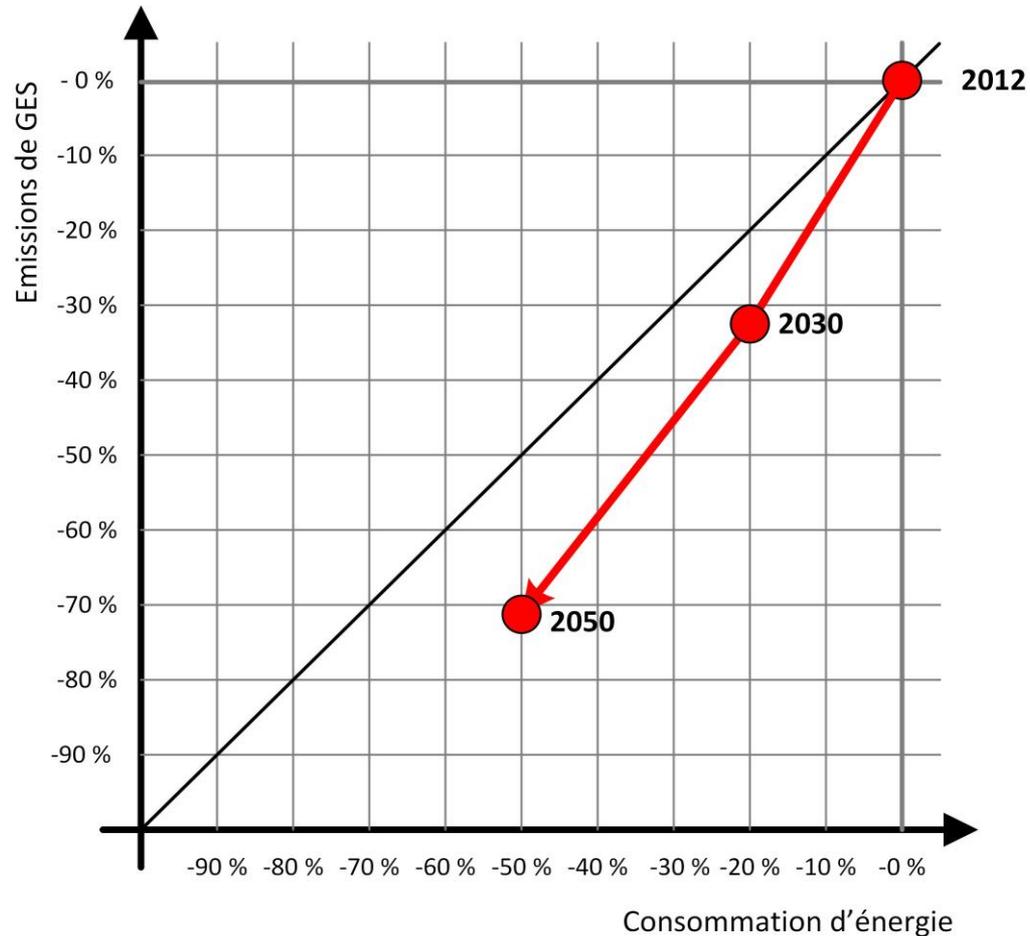
La récupération directe du CO₂ dans l'atmosphère

- L'autre voie pour récupérer le CO₂ déjà rejeté dans l'atmosphère aux côtés du BECCS (Bioénergie avec capture et stockage du carbone)
- Une opération pilote est en cours en Islande (Orca)
- Objectif du pilote : 4 000 t de CO₂ récupérés par an par 8 collecteurs
- Consommation d'énergie : 2 000 kWh par t de CO₂ récupérée (objectif 2030)
- Perspectives long terme : 10 Gt de CO₂ récupérées moyennant 20 000 TWh consommés (~ production mondiale d'électricité)
- Utopie ? La décarbonation totale peut être à ce prix



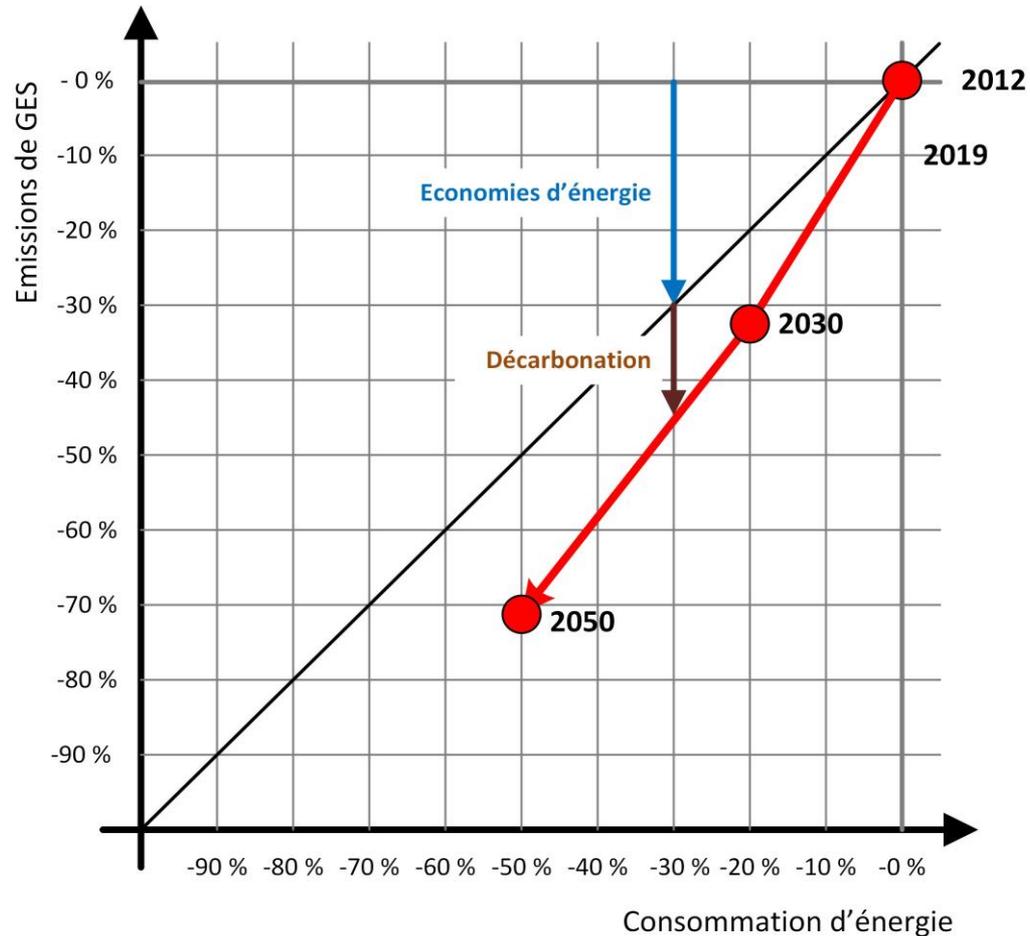
Remarques sur la stratégie Energie-Climat

- Les objectifs Energie-Climat sont définis par le Code de l'Énergie



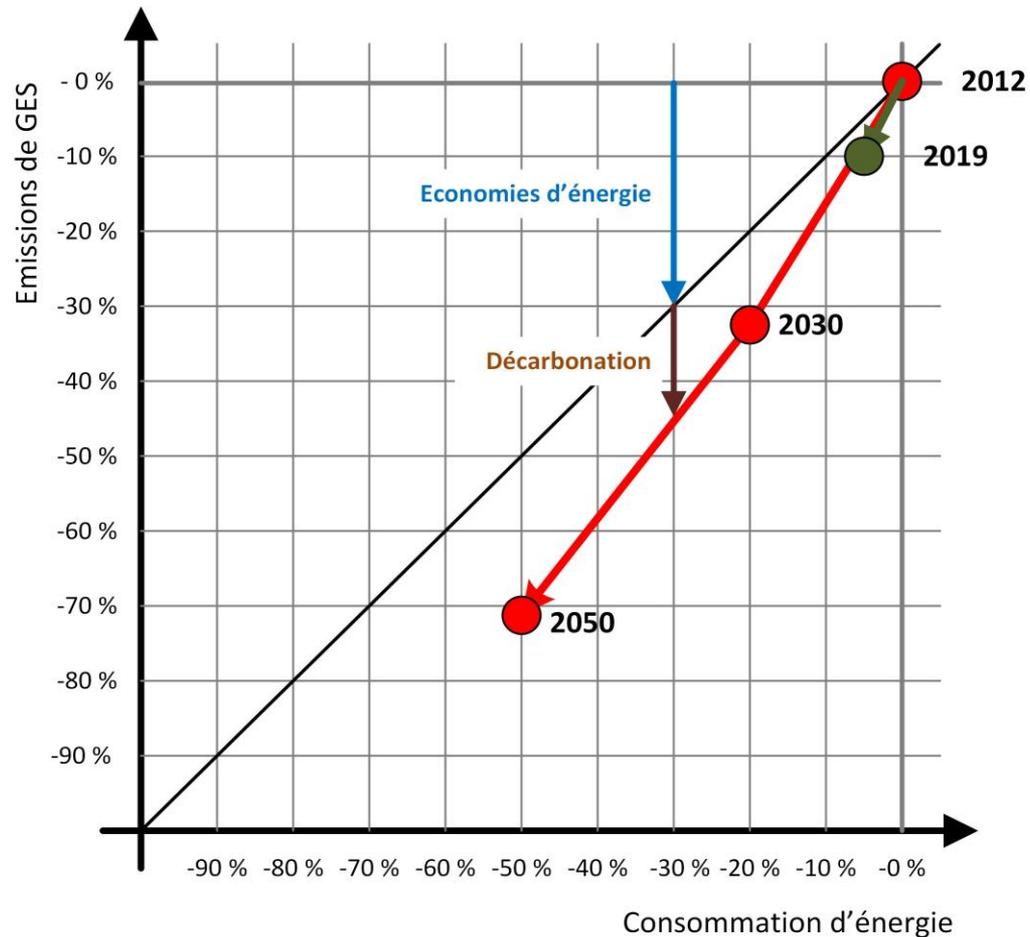
Remarques sur la stratégie Energie-Climat

- La stratégie E-C combine économies d'énergie et décarbonation



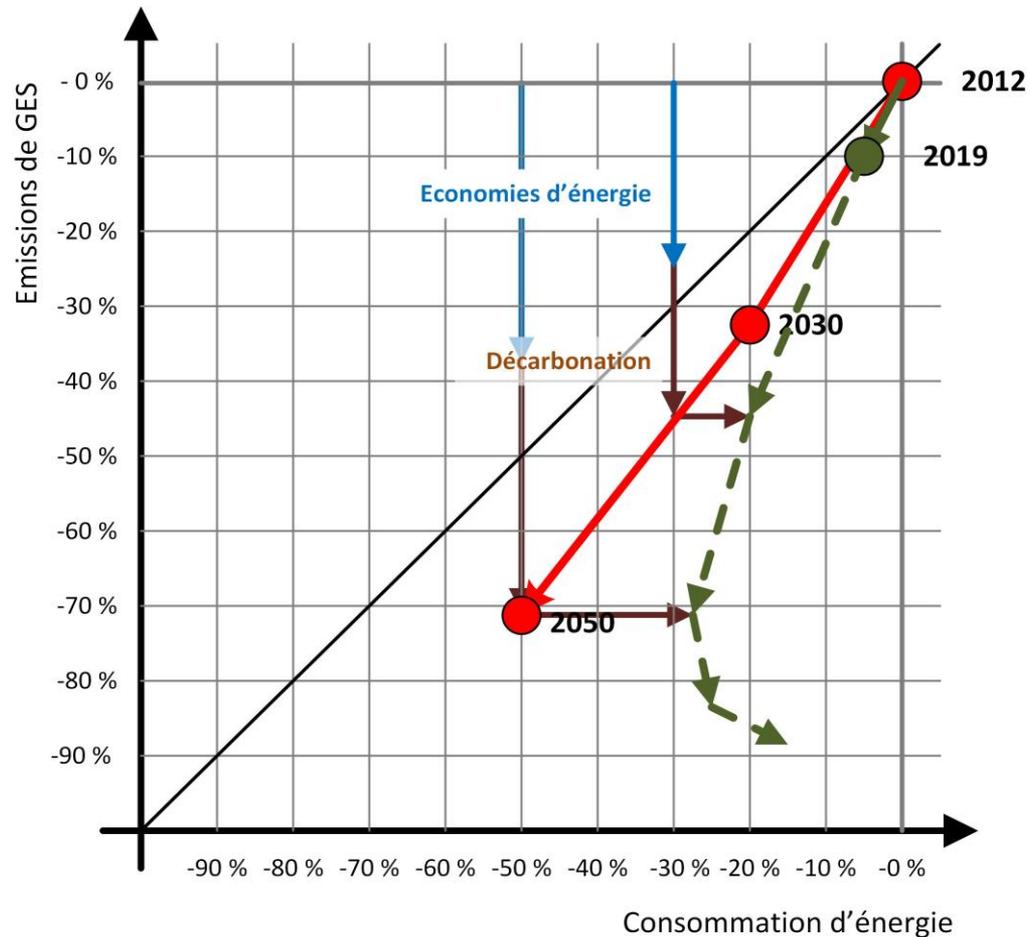
Remarques sur la stratégie Energie-Climat

- Les résultats 2019 sont à peu près sur la trajectoire mais peut-on extrapoler ?



Remarques sur la stratégie Energie-Climat

- Les économies d'énergie vont être de plus en plus difficiles à réaliser et la décarbonation profonde va demander de plus en plus d'énergie



Conclusions

- Les économies d'énergie sont indispensables mais on a tendance à en surestimer le gisement et à en sous-estimer le coût et la difficulté
- Elles doivent être correctement évaluées, sur la base de critères objectifs
- Des objectifs de plafonnement en valeur absolue des consommations d'énergie sont à éviter, sauf périodes de rationnement obligatoire
- La décarbonation va coûter cher, elle va également demander de plus en plus d'énergie
- C'est le couple « émissions de CO₂-consommation d'énergie » qu'il faut optimiser, dans une approche systémique et en donnant la priorité à la réduction des émissions. La recherche d'économies d'énergie ne doit pas devenir un obstacle à la décarbonation
- Les conditions de la décarbonation profonde restent mal connues et nécessitent un effort important de recherche