

# RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

## Vérités scientifiques et techniques actuelles

### Solutions envisageables

*Note de l'auteur : le texte et les illustrations ci-dessous sont extraits d'une conférence donnée à l'Académie d'Arras en 2003. Ils n'ont pas vocation à retransmettre l'intégralité des propos tenus par l'orateur mais plutôt à lister un certain nombre d'observations et d'idées force sur ce vaste sujet d'actualité et évoqués lors de cette conférence.*

### Quelques définitions pour commencer

Climat : Ensemble de circonstances atmosphériques et météorologiques (humidité, pressions, températures...) propres à une région

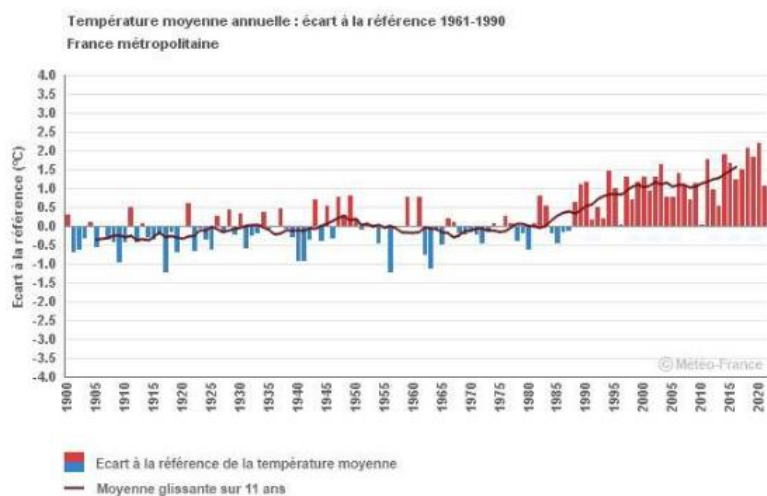
Réchauffement : Chauffer (ce qui s'est refroidi)

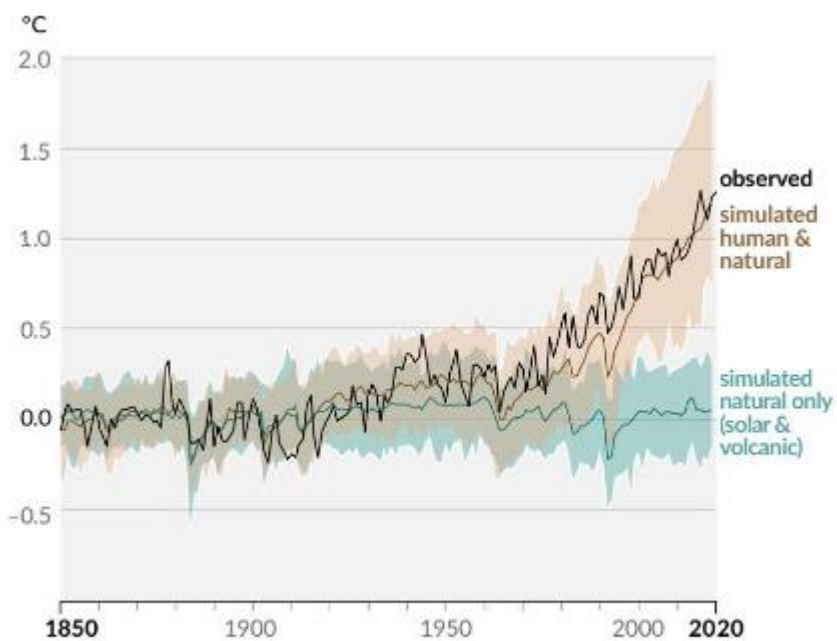
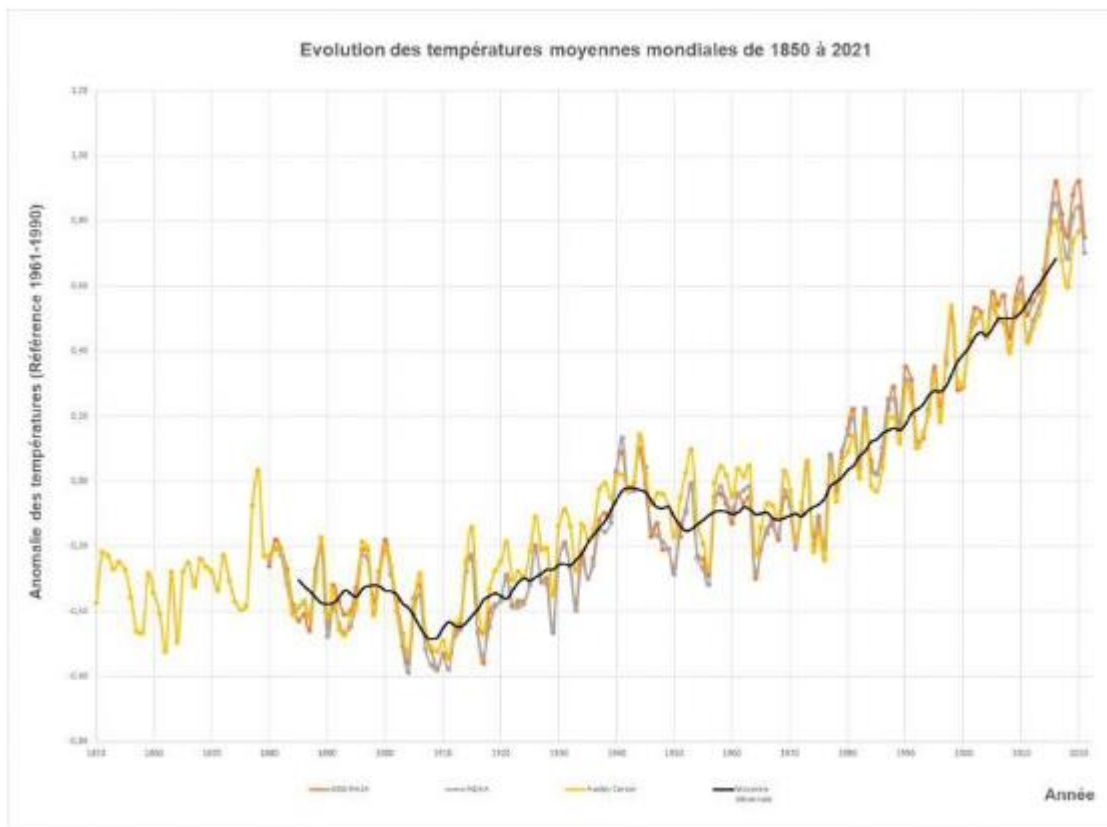
« Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible. » *Antoine de Saint Exupéry, Citadelle, 1948*

### Les bases du constat

#### L'évolution des températures et autres variables d'intérêt

Les relevés des températures observées à la surface du globe, soit actuellement, soit par l'analyse de carottes glaciaires prélevées aux pôles font état d'une augmentation significative de cette température depuis les années 1980-85.



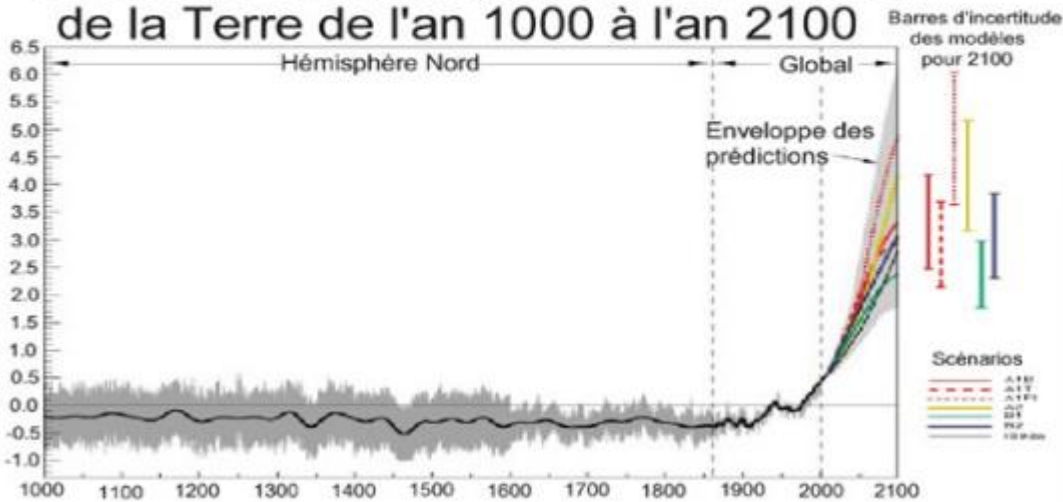


Source Rapport GIEC 2021

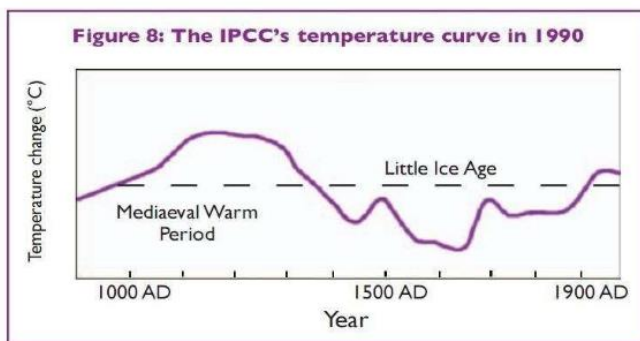
Des études conduites par le GIEC (Groupe international d'experts du climat), il ressort que la température moyenne en surface du globe augmenterait de 2 à 5°C d'ici l'année 2100.

Source GIEC

## Variations de la température de surface de la Terre de l'an 1000 à l'an 2100



Certains objectent que dans un passé assez lointain, il y a déjà été observé des variations assez importantes de température.



IPCC - International Panel for Climate Change

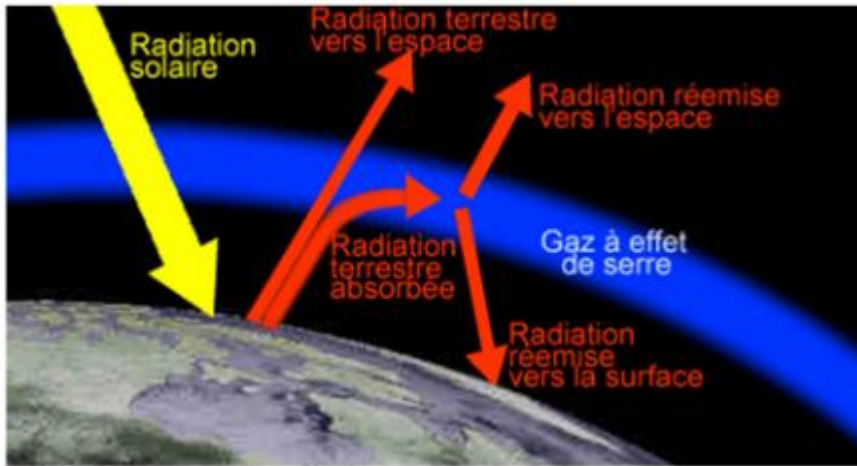
Il apparaît que les causes de ces événements climatiques observés sur de périodes assez éloignées dans le temps ne sont pas identiques. C'est l'avis très partagé de la communauté scientifique internationale.

Compte tenu des désordres que provoquerait une hausse brutale des températures (au sens inhabituel et relativement rapide), la communauté internationale s'est mobilisée afin de trouver solutions ou remèdes à mettre en œuvre pour freiner cette évolution.

### Les causes principales identifiées par le GIEC

- Effet de serre
- Evolution de la population mondiale
- Cycles de Milankovitch et variations climatiques

Qu'est-ce que l'effet de serre ?



Le rayonnement solaire parvenant à la surface de la Terre est absorbé et une partie est réémise sous forme infra rouge vers l'atmosphère.

Les gaz à effet de serre sont relativement imperméables aux infrarouges et ce rayonnement est « piégé » dans l'atmosphère terrestre.

L'effet de serre permet de maintenir une température suffisante sur terre. Sans effet de serre, la température terrestre serait de l'ordre de  $-18^{\circ}\text{C}$ .

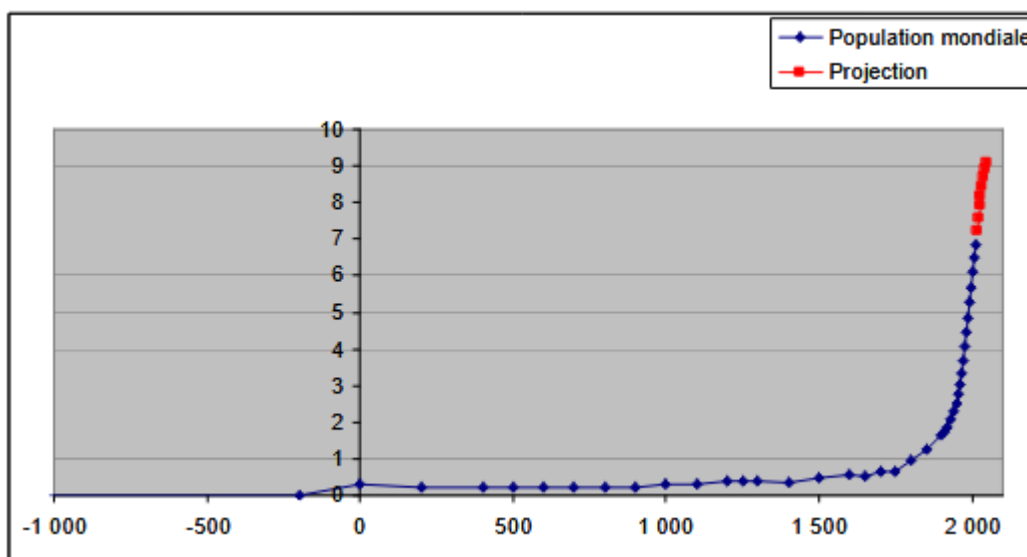
Il a été répertorié 6 principaux gaz à effet de serre émis par les sociétés humaines :

- Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), émis par la combustion d'énergies fossiles, la déforestation et urbanisation, etc.
- Le méthane ( $\text{CH}_4$ ), émis principalement par l'élevage des bovins et ruminants, processus de méthanisation, compost pas assez aéré.
- L'Hydrofluorocarbure (HFC), gaz réfrigérants, décharges d'ordures, exploitations minières et pétrolières.
- Le Protoxyde d'Azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), industries du froid et automobile.
- Le Perfluorocarbure (PFC), climatiseurs, systèmes de froid et extincteurs.
- L'Hexafluorure de Soufre ( $\text{SF}_6$ ), industrie pharmaceutique.

## Impact de la population mondiale

### Evolution de la population mondiale

Il est intéressant d'observer l'évolution en nombre d'habitants de notre planète au cours du temps.



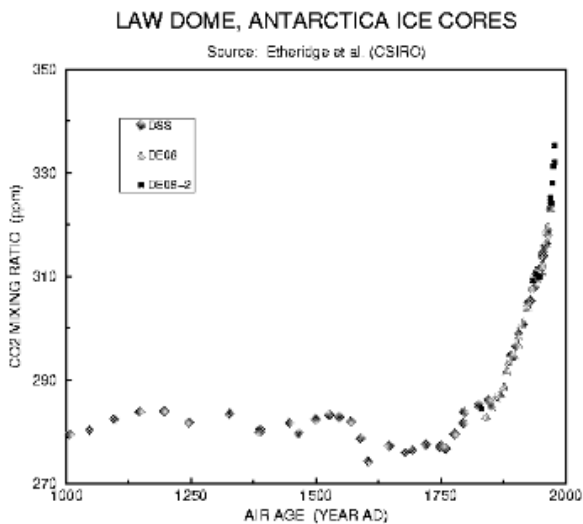
On peut observer que la croissance de la population mondiale devient quasi exponentielle à partir des années 1800-1850. Cette époque correspond peu ou prou à celle du développement industriel permis par l'extraction du charbon d'abord, des hydrocarbures ensuite.

L'allure de cette courbe est similaire à celle de la croissance du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, ce qui n'est pas pour surprendre, les énergies dites fossiles étant composées pour l'essentiel de carbone et d'hydrogène combinés.

Il suffit de regarder attentivement la courbe suivante pour établir une simultanéité de la forme des courbes d'évolution du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et de la population mondiale.

Ceci signifie que le modèle de départ assumant un développement sur la base d'une consommation d'énergie qui restait spécifiquement constante était quasi linéaire.

Compte tenu des observations faites sur l'impact des rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère sur la température moyenne du globe, il apparaît que ce modèle nous conduit à une augmentation linéaire (voire plus rapide encore) des températures et qu'il devient évident qu'il n'est plus supportable à l'échelon de notre planète.



## La théorie de Milankovitch

Ce que dit cette théorie :

Il existe une corrélation entre les caractéristiques de l'orbite terrestre autour du soleil, l'inclinaison de l'axe de la Terre sur son orbite et la variation de la température terrestre (variation de la glaciation)

Ces variations font apparaître 2 périodicités majeures :

- L'une de 100 000 ans environ
- L'autre de 41 000 ans environ

Source : l'ensemble des archives climatiques (concentration atmosphérique, température, accumulation de glace, etc) issues des carottages glaciaires, et en particulier des forages de Vostok et du Dôme C en Antarctique qui fournit des informations importantes sur le lien entre le forçage orbital et le système climatique terrestre sur les derniers 700.000 ans avec une résolution temporelle remarquable.

Cependant, l'évolution récente du climat (100 ans par rapport aux périodicités de la théorie de Milankovitch, c'est très peu) démontre que ces facteurs que je qualifierai d'orbitaux ne suffisent pas à expliquer l'évolution importante (et récente à l'échelle dont nous parlons) des températures observées à la surface du globe.

## Les facteurs qui affectent le climat

### Facteurs astronomiques

- des changements dans l'activité solaire
- des variations dans l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil
- des changements dans l'inclinaison de l'axe de la terre (obliquité) et la précession de l'axe de la terre des collisions avec des astéroïdes ou des comètes.

## Facteurs géologiques

- la dérive des continents,
- des changements dans la topographie des fonds océaniques les éruptions volcaniques
- la formation de montagnes l'érosion et l'altération des roches.

## Facteurs océaniques

comme :

- l'effet du phénomène El Niño
- des changements dans la circulation océanique à cause des variations du niveau de la mer
- la formation de glace
- les efflorescences phytoplanctoniques
- la production de sulfure de diméthyle.

## Facteurs intervenant à la surface de la terre

- notamment l'effet de la végétation sur l'albédo de la surface, l'évapotranspiration de la végétation.
- les effets des plans d'eau, y compris l'irrigation et la poussière.

## Facteurs atmosphériques

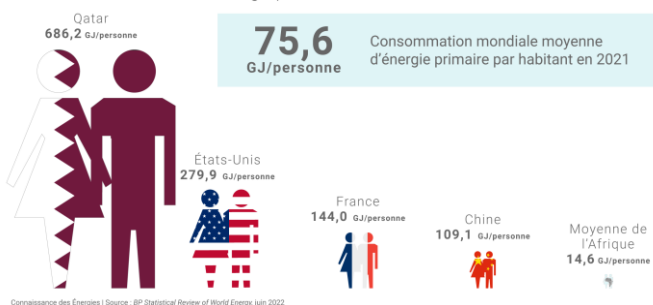
- tels que le rôle des gaz à effet de serre, du dioxyde de soufre et des polluants atmosphériques les effets de la couche nuageuse et les interactions entre l'air, la terre et la mer.

Tout ce qui précède démontre l'influence de l'humanité sur l'évolution récente du climat de la Terre

Le GIEC confirme donc le caractère anthropique (lié à l'homme), du réchauffement climatique constaté

## Energie : sources et limites

Monde La consommation d'énergie par habitant en 2021



## Panorama actuel des ressources en énergie (à la date de 2010)

Type d'énergie	Réserves mondiales (en unité physique)	Réserves mondiales (en exajoules)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en EJ)	Nombre d'années de production à ce rythme
Pétrole	245 Gt	10 249	25 %	184	56

<b>Gaz naturel</b>	206 Tm3	7 832	19 %	145	54
<b>Charbon</b>	1 076 Gt	22 436	55 %	160	139
<b>Total fossiles</b>	<b>40 517</b>	100 %		<b>83</b>	
<b>Uranium</b>	6,15 Mt	2 133	5 %	25	91
<b>Thorium</b>	6,4 Mt	nd	nd	ns	Ns
<b>Hydroélectrique</b>	21 PWh/an	75 (par an)	40	ns	
<b>Énergie éolienne</b>	39 PWh/an	140 (par an)	6,7	ns	
<b>Solaire</b>	1 070 000 PWh/an	3 849 000 (par an)	3,7	ns	
<b>Biomasse N 8, 8</b>	3 000 EJ/an	3000 (par an)	57,0	ns	

### De la surgénération comme source quasi infinie

Des études sur des réacteurs nucléaires de nouvelle génération ont été lancées par le Forum international Génération IV, avec des objectifs d'amélioration de la sûreté, de diminution de la quantité et de la nocivité des déchets et de préservation des ressources.

Les réacteurs à neutrons rapides, en particulier Astrid, pourraient répondre à ces objectifs car plus efficaces vis-à-vis de la ressource en uranium et aptes à recycler complètement le plutonium.

En effet, les réacteurs à eau pressurisée actuels ne peuvent utiliser comme combustible que la part fissile de l'uranium naturel (uranium 235), soit environ 0,7 % de la ressource. En revanche, les réacteurs à neutrons rapides seraient capables d'utiliser tout type d'uranium, non seulement la part fissile mais aussi la part dite fertile (par exemple l'uranium 238, présent à 99,3 % dans l'uranium naturel).

Ainsi, avec l'uranium appauvri déjà présent sur le territoire français et le plutonium issu du combustible utilisé des centrales actuelles, les réacteurs à neutrons rapides permettraient de produire de l'électricité pendant plusieurs milliers d'années au rythme de la consommation actuelle.

La surgénération évite l'étape d'enrichissement de l'uranium, affirme multiplier par 100 la quantité de combustible utilisable et fortement diminuer le volume de déchets.

Inconvénient important : le process met en œuvre du sodium fondu dont le maniement est délicat et peut s'avérer très dangereux.

Le projet Astrid a été abandonné en 2019 par l'Etat car qualifié de « non urgent » compte tenu des réserves d'uranium actuelles.

Certains ont critiqué cette décision qualifiée de « politique » compte tenu de la pression exercée par les écologistes.

### Que faut-il retenir de tout cela ?

Heureusement qu'il y a un effet de serre sinon la t° moyenne de la terre serait de -18°C...

Dans le passé, il est indéniable que des causes externes (soleil, éruptions, météorites) ont provoqué des variations climatiques importantes.

Depuis un siècle environ, ces causes externes ne sont plus prépondérantes, le réchauffement observé étant principalement d'origine anthropique (lié à l'homme). Aujourd'hui, le GIEC a lui tranché en faveur de la cause anthropique.

De toute façon, le problème n'est pas seulement là .....

Même si la thèse du réchauffement climatique provoqué par l'homme s'avérait inexacte ce qui aujourd'hui est plus qu'improbable, les ressources naturelles s'épuisent Alors on fait quoi ????

### Quelques échelles et un aperçu sur les ordres de grandeur

1TEP (Tonne d'équivalent pétrole) =11,7 MWh

Consommation mondiale d'énergie :

9GTEP= 9 000 000 000 TEP= 100 000 000 000 MWh=100 000 TWh

Soit la production de 20 000 tranches 600 MW de centrale nucléaire

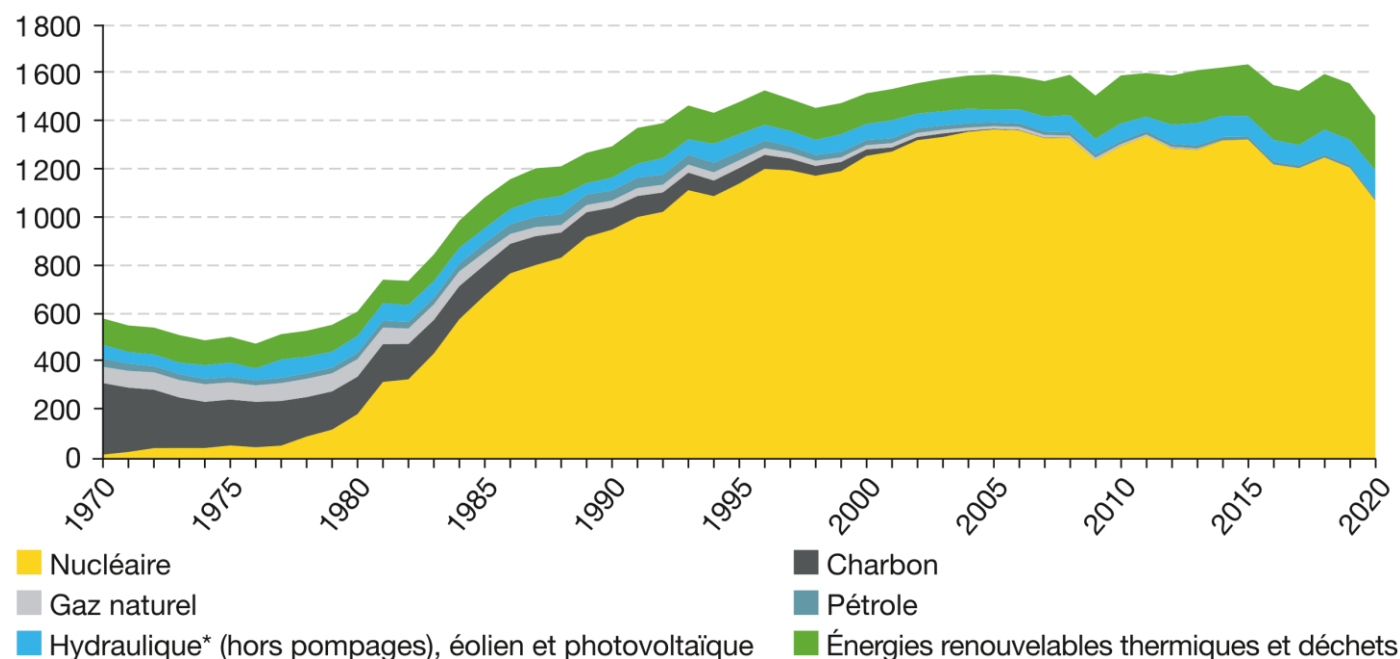
Énergie solaire reçue par la Terre : 600 000 000 de tranches de centrale nucléaire

Centrales en service dans le monde : 441 réacteurs dans 31 pays

Ce constat numérique nous démontre que notre avenir énergétique n'est pas dans l'exploitation sans limites des réserves souterraines accumulées au cours des millénaires, mais plutôt dans l'utilisation à profusion de l'énergie solaire là où les données thermodynamiques le permettent.

### Historique de l'évolution des consommations d'énergie en France

En TWh



### Un nouveau modèle énergétique

La seule énergie qui ne coûte rien et qui ne pollue pas du tout est celle qu'on ne consomme pas !

Rappel : objectifs du Grenelle environnement (2012)

Diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre de la France en 2050

Sous-entendu diviser la consommation énergétique carbonée en proportion ou adopter des énergies renouvelables à due concurrence.



Vaste programme.....

Essayons d'en parcourir quelques aspects particulièrement prégnants.

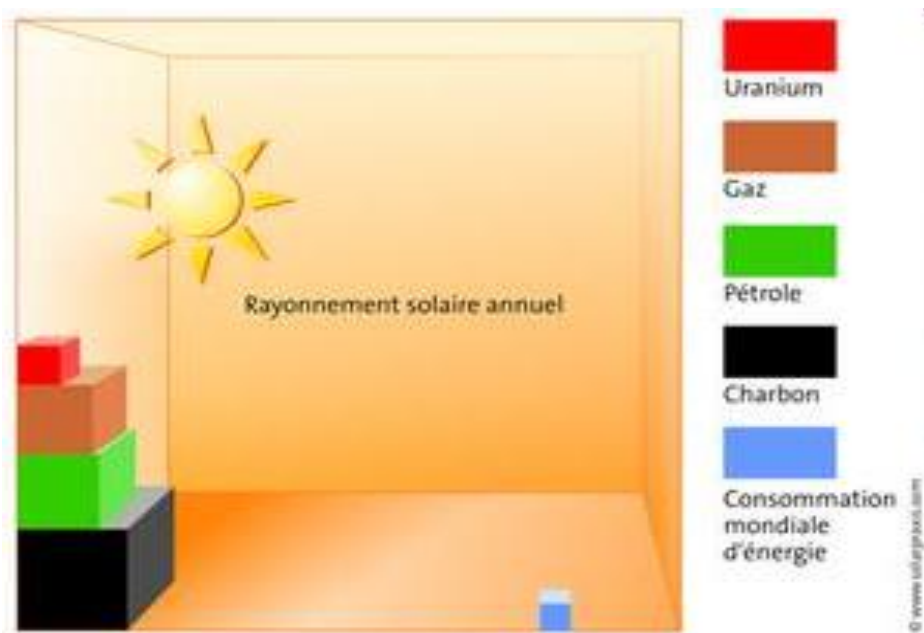
De ce qui précède, il résulte que les seules ressources fiables et non carbonées disponibles en quantité sont constituées par l'énergie solaire et l'énergie électrique d'origine nucléaire.

Il ne faut pas négliger non plus le fait que la production d'énergie électrique se traduit par la production simultanée d'une émission de chaleur dont l'énergie totale est de l'ordre de grandeur de l'énergie électrique produite.

Il y a donc lieu de réserver à l'avenir ce type d'énergie aux applications qui nécessitent de la force motrice (moteurs, etc...). Le chauffage électrique par des « grille pains » est une ineptie du point de vue du réchauffement climatique.

NB : Pour les explications concernant les préfixes numériques des unités, on pourra consulter

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A9fixes\\_du\\_Syst%C3%A8me\\_international\\_d%27unit%C3%A9s](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A9fixes_du_Syst%C3%A8me_international_d%27unit%C3%A9s)

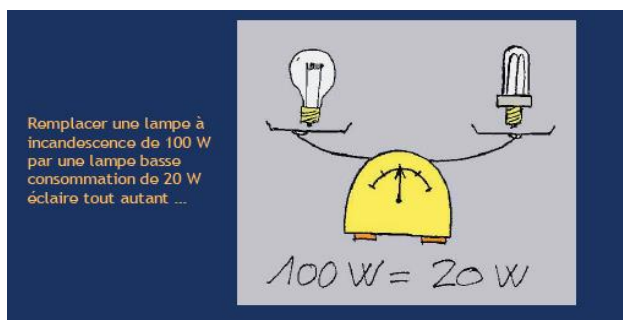


Voici une illustration graphique des relations entre les quantités d'énergie primaire disponible, comparées à la consommation annuelle de tous les êtres humains.

D'un côté les 9 gigatonnes/an équivalent pétrole (Gtep) et de l'autre 250 000 Gtep arrivant sur Terre (100 000 Gtep net) sous forme de rayonnement solaire. Il est possible d'apprécier aussi la limitation des ressources en combustibles fossiles d'autre nature, et la limitation du nucléaire.

Le solaire est disponible en très grande quantité.

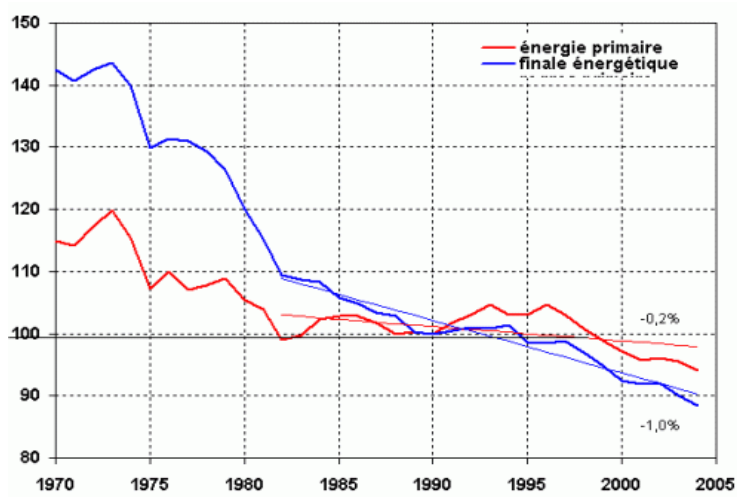
L'important est donc d'en valoriser une petite partie.



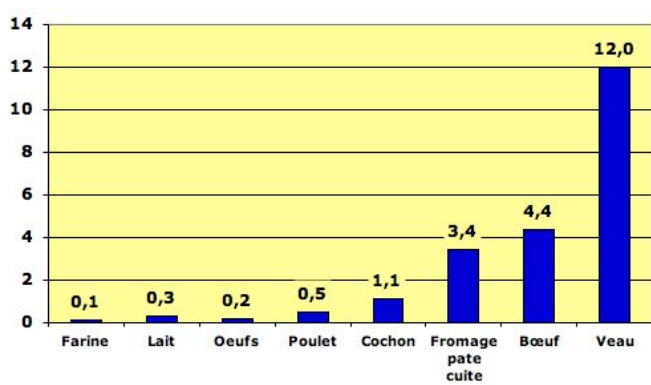
# Quelques exemples de choses de la vie courante et leur impact sur la consommation globale...

L'Industrie- L'agriculture- Le logement- Les transports

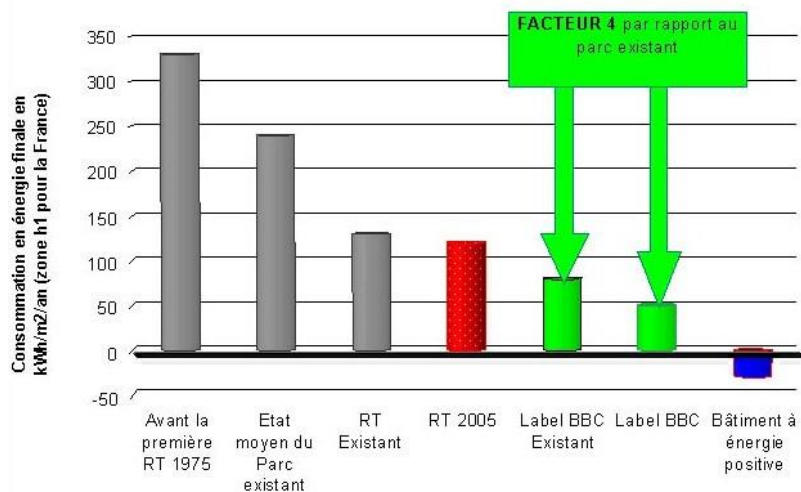
Industrie. L'évolution de l'intensité énergétique primaire et finale en France



Emissions de gaz à effet de serre de notre nourriture



Comparaison des consommations pour différents types de logement

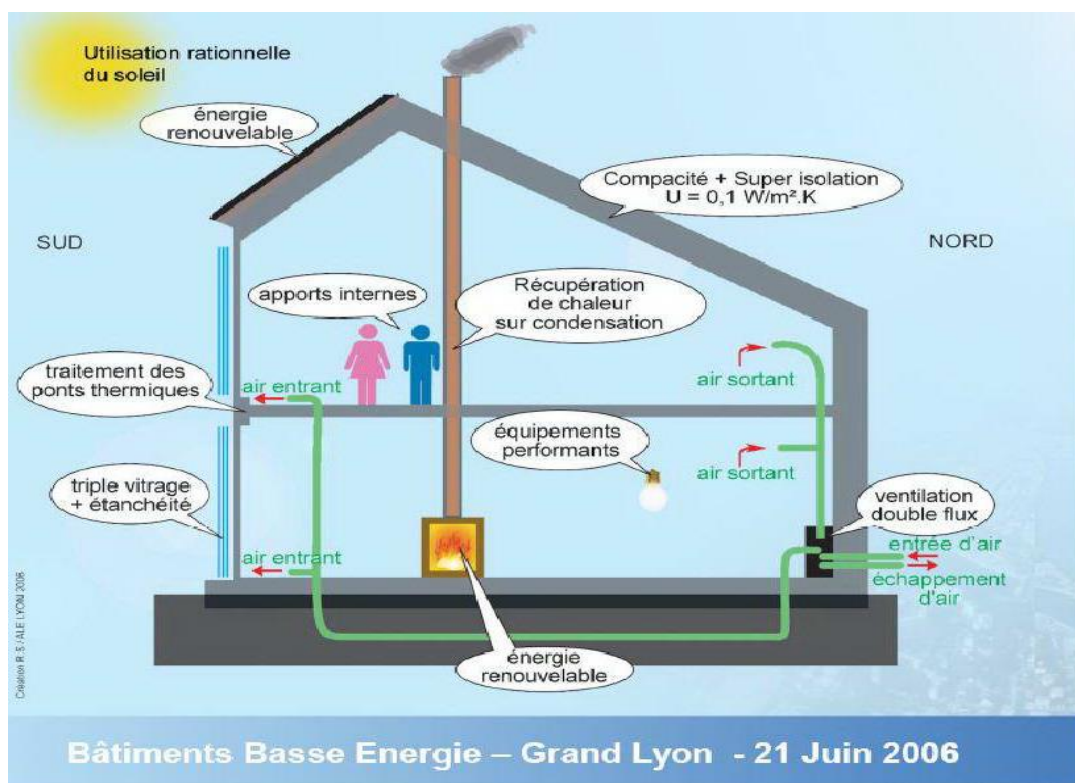


Objectifs de consommation :

pour la construction : 50 kWh/m2/an

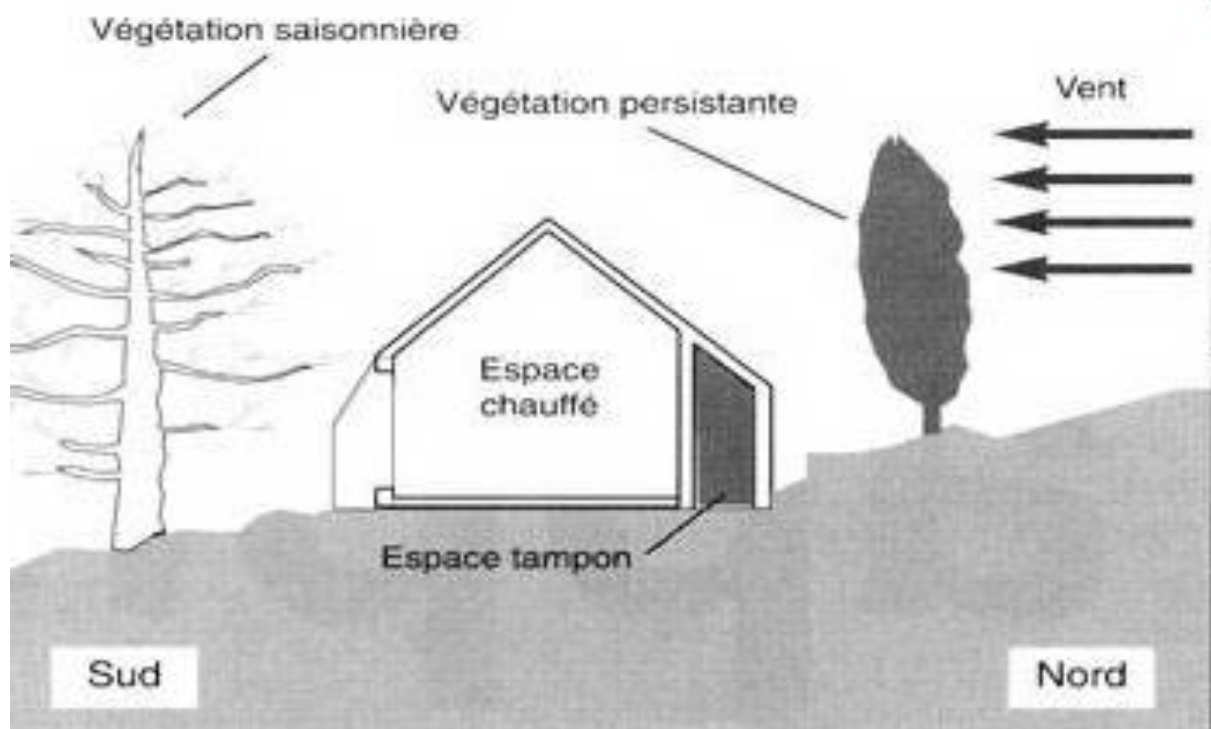
pour la rénovation : 80 kWh/m<sup>2</sup>/an

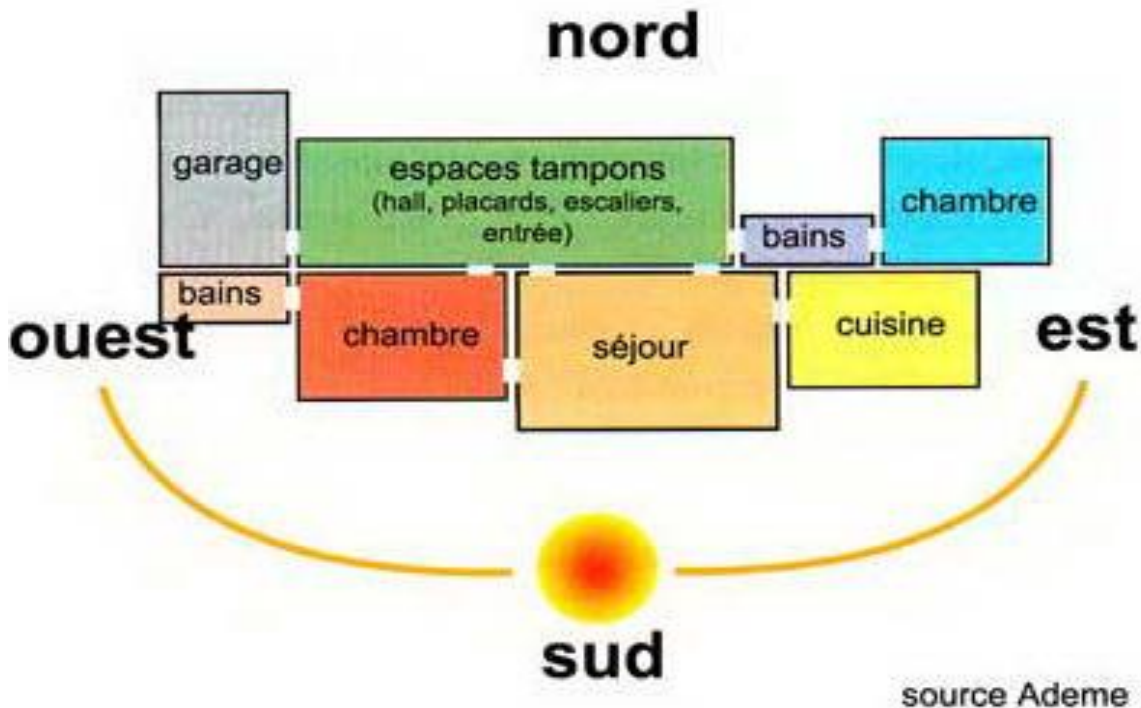
Quelques exemples d'améliorations liées au domaine du logement



L'attention apportée à la circulation de l'air et à la récupération de l'énergie de l'air extrait par la VMC (ventilation mécanique contrôlée) permet des économies de l'ordre de 25 % sur le chauffage des habitations.

L'orientation des habitations permet de profiter au maximum des effets du soleil en hiver. La végétation soigneusement disposée permet également de diminuer l'effet du vent en cassant la transmission de chaleur par convection. La disposition des pièces permet également d'optimiser les apports solaires et de diminuer les pertes thermiques.





#### Photovoltaïque

- Conversion d'énergie solaire en électricité
- Rendements de 10 à 12% actuellement
- Coût : 4000 à 7000 € par kW crête
- Rentabilité sans aides : 15 à 20 ans
- Des nouveaux panneaux annoncés à 20%
- Pas d'électricité la nuit !!!!! -> stockage ???
- (En France le stockage hydraulique permet de faire face à 5,4% de la production...)
- Apparition de nouvelles cellules « organiques » à base de polymères (moins chères mais au rendement actuellement inférieur de 50% à celui des cellules classiques)

La question du stockage est importante dans la mesure où le soleil a son propre cycle « d'apparition »...

Le couplage avec le réseau d'énergie électrique est une possibilité mais impose une marche discontinue des centrales nucléaires de production, ce qui n'est pas favorable à leur rendement et à leur « santé » technique.

Des solutions à partir de piles à combustible sont envisagées. Il y a également la possibilité d'utiliser les batteries électriques des voitures qui utilisent cette énergie (qui ne roulent pas en permanence) et là il y a une synergie importante à développer.

#### Les autres énergies renouvelables

##### *Le bois 1<sup>ère</sup> énergie renouvelable*

1 stère = 500 kg de bois sec = 300 l de fioul

Une utilisation essentiellement festive

Le nombre de chauffages au bois décroît en France

De nouveaux modes d'utilisation : granulés, etc..

Chauffage et eau chaude des logements nécessitent en France 66 MTEP

Soit 220 millions de stères....

L'industrie papetière consomme en France 8,6 MT soit environ 17 M de stères.

## Agrocarburants : quel destin ?

### La transformation de l'énergie solaire par photosynthèse

	T sucre/ha	TEP récoltées	TEP bio carburant		
Canne à sucre	20	9	5,9	8,9	GTEP
Betterave sucrière	12	5,4	3,6	5,3	GTEP
Maïs	6	2,7	1,8	2,7	GTEP
Blé	4	1,8	1,2	1,8	GTEP
	Récolte				
Colza	3,5	1,4	0,9	1,4	GTEP
Surface mondiale cultivée		1 500 000 000			

Le tableau précédent donne les ordres de grandeur de l'énergie solaire captée et stockée par photosynthèse pour quelques plantes remarquables par leurs capacités à stocker de l'énergie en général sous forme de sucre(s).

### L'éolien : la solution de grand-père revisitée

Inconvénient majeur : ne produit que lorsqu'il y a du vent (20% du temps)

Nécessite donc un équipement conséquent en stand by pour pallier l'absence de vent

Il faudrait 600 000 éoliennes de 2 MW chacune pour alimenter la France soit 30 000 km d'éoliennes alignées tous les 50m !!!

Corollaire : maintien d'un parc de centrales classiques « au cas où »

Coût d'investissement prohibitif par rapport au nucléaire.

Coût de rachat exorbitant : 3 à 4 fois le prix de production nucléaire

Coût annuel pour la France du rachat d'électricité d'origine « renouvelable » : 2,5 milliards d'euros

Un intérêt grandissant pour les parcs d'éoliennes « off shore » moins polluants visuellement mais des investissements élevés.

Possibilités techniques d'asservir certaines consommations à la disponibilité d'énergie éolienne (froid, chauffage)

Avantage : pas de déchets radioactifs

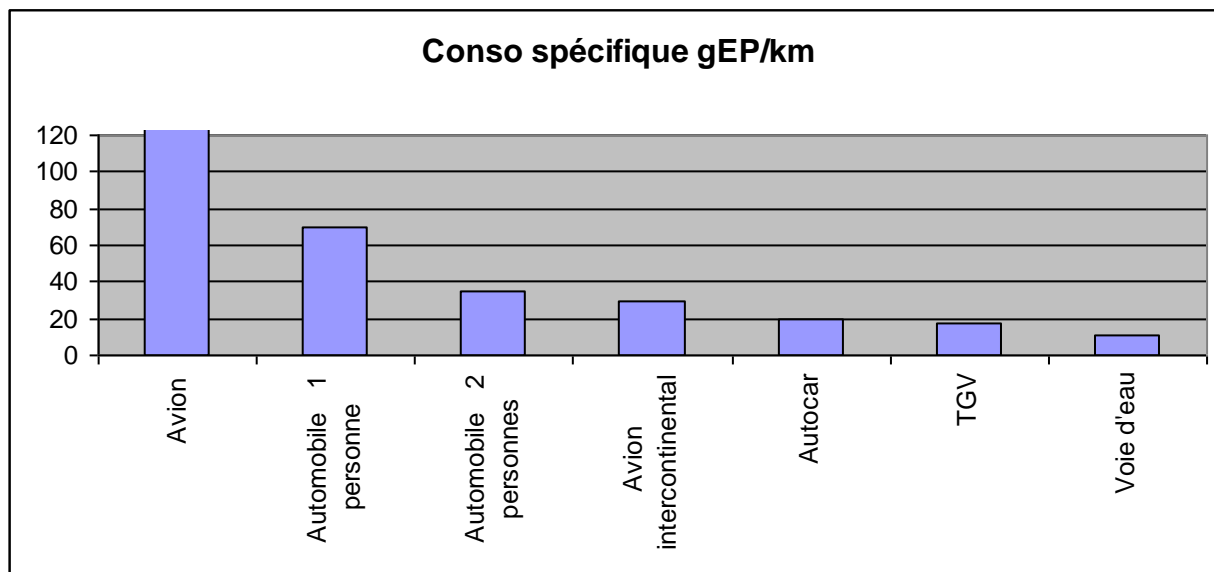
Filière à suivre...

*Le petit tableau suivant resitue les différents types d'énergies renouvelables et les coûts actuels.*

	Investissement	Coût de production
Eolien	1 à 1,6 M€/MW	57 à 90 €/MWh
Nucléaire	0,9 M€/MW	53 à 60 €/MWh
Photovoltaïque	0,6 à 1,1 M€/MW	142 €/MWh
Hydraulique	2 à 6 M€/MW	15 à 20 €/MWh

## Transport de marchandises

Le transport par rail coûte 4 fois moins d'énergie que par la route et 9 fois moins que par avion, le transport le moins cher étant la voie d'eau.



Énergie consommée par km et par voyageur :

Mode de transport	Automobile 2 pers.	Autocar	TGV	Petit avion courte distance	Gros avion trajet intercontinental
en gramme équiv.pétrole	35	20	17	170	30

Tableau 11

Quelques pistes de réflexion pour diminuer l'impact des transports sur le climat

Achetez des petites voitures pour les déplacements

Développons le co voiturage

Limitons nos déplacements (téléconférence, internet, travail à domicile)

Vers une vie sociale de « proximité »

N'achetez plus de fruits et légumes hors saison qui sont acheminés par avion

Le « camion » du futur reste à inventer (le rail n'est pas la panacée)

Faut-il en revenir à une production de proximité pour éviter les transports de biens ?

**En conclusion, Il y a beaucoup de solutions.**

La meilleure solution (rapide et peu chère) est d'économiser l'énergie.

Tout ceci devrait favoriser l'émergence de nouvelles activités industrielles et la constitution de groupes sociaux intéressés par les aspects pratiques du sujet.

Marc Villain

*Membre résidant de l'Académie des sciences arts et lettres d'Arras.*

*Ingénieur de l'Ecole Centrale de Paris*

*Ancien dirigeant (industriel) de groupes agroalimentaires à taille européenne.*

*Habite une maison solaire passive conçue par lui-même dans le Pas-de-Calais (!!!)*

*A donc pu vérifier par l'expérience (personnelle et professionnelle) une grande partie des idées exposées ci-dessus....*