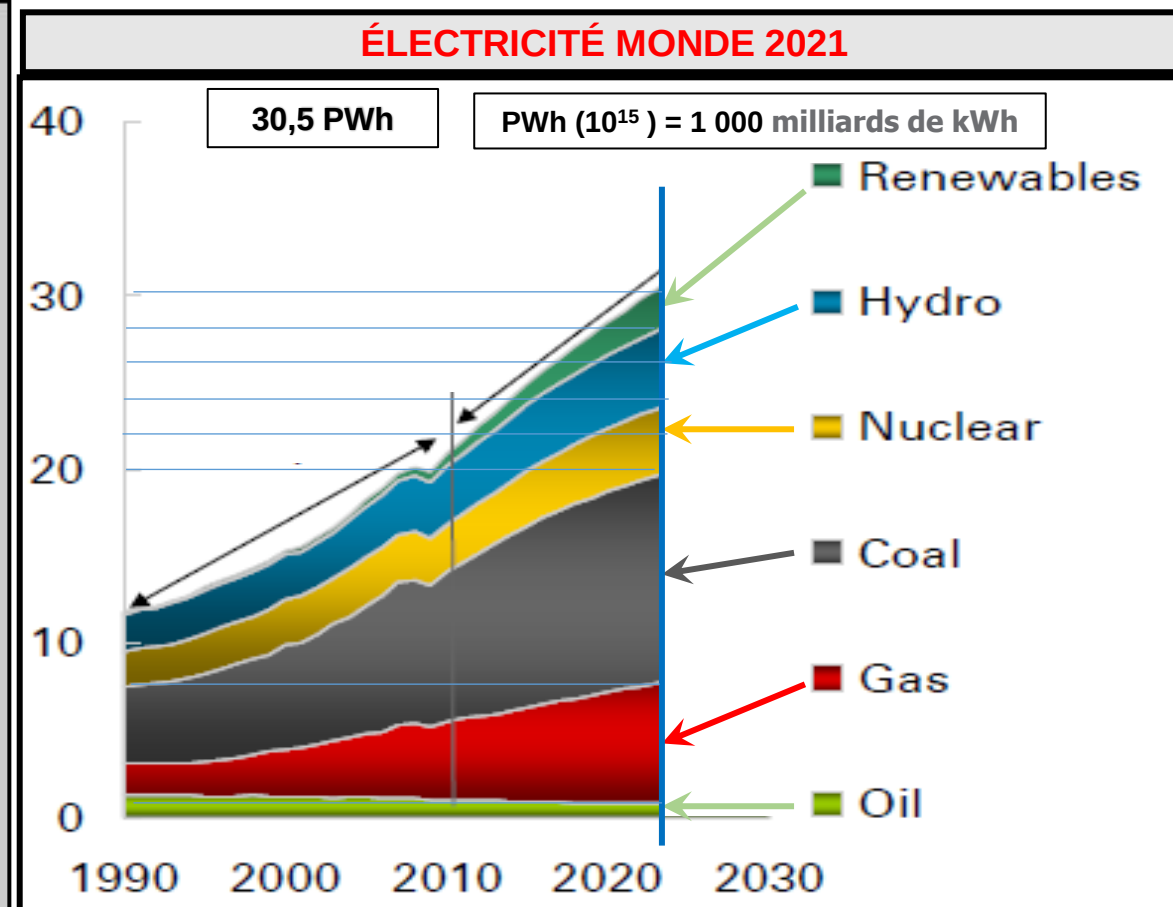
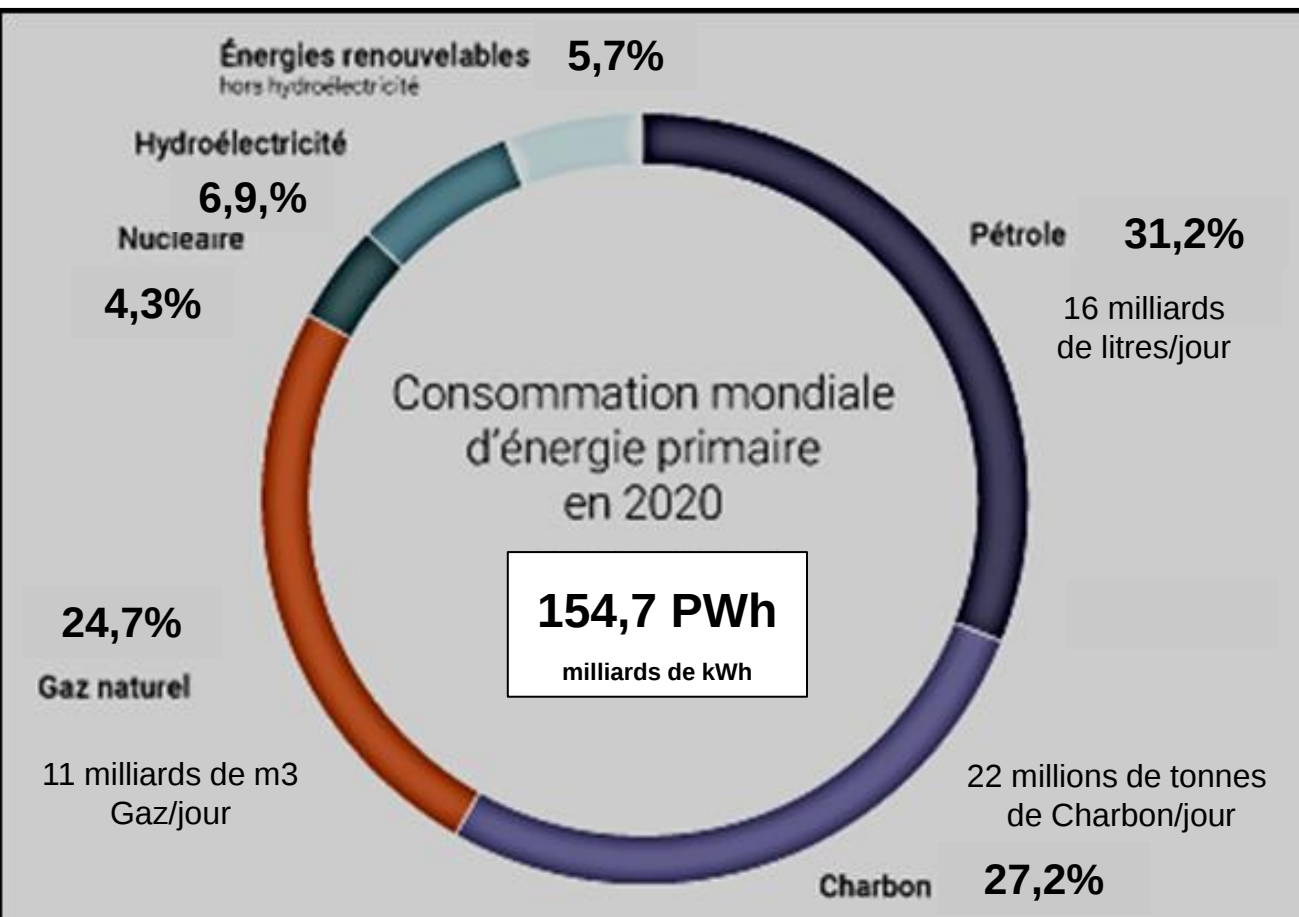




LE CLIMAT ET LES ÉNERGIES : QUE FAIRE ? RÉFLEXIONS SUR DES SOLUTIONS RÉALISTES





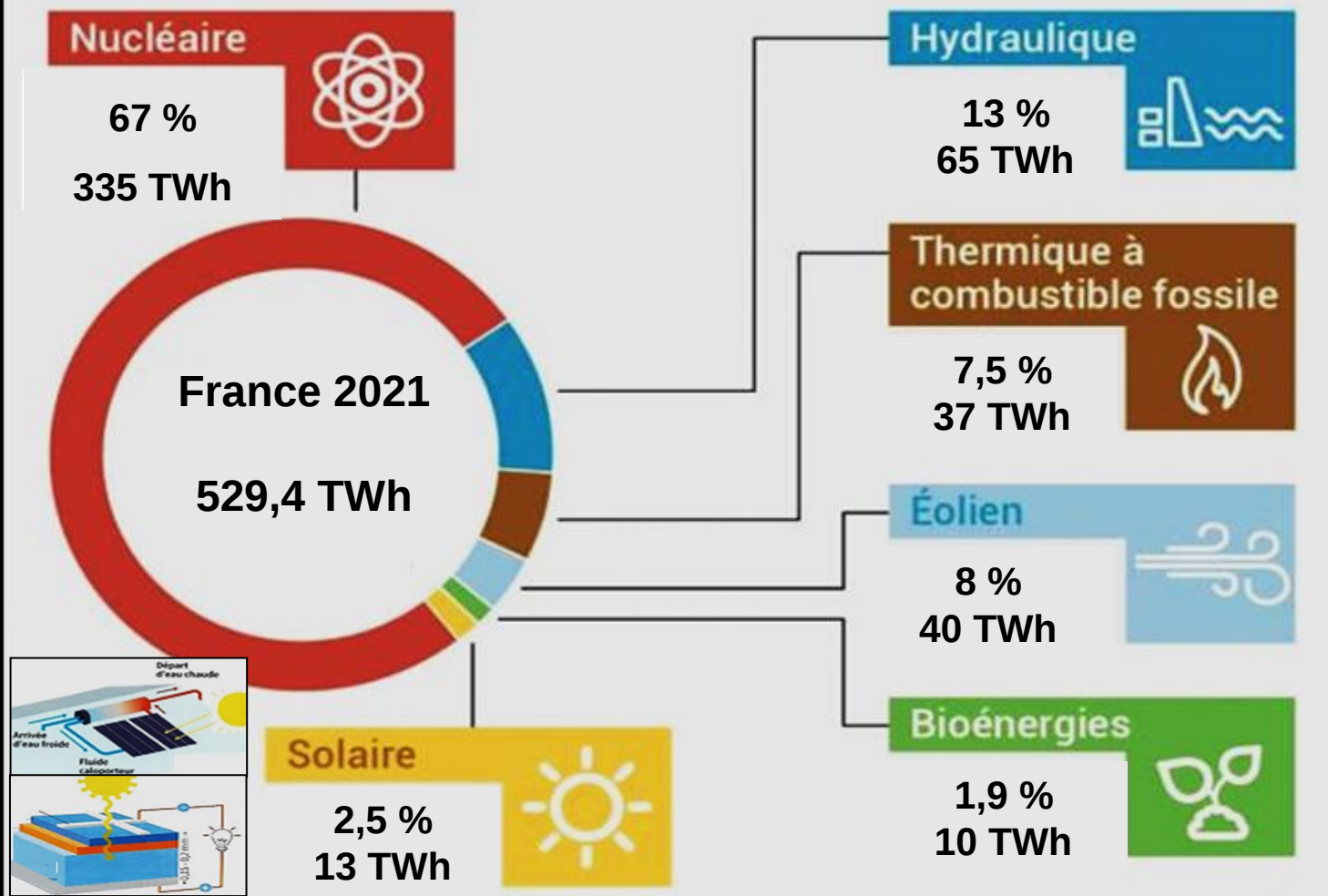
EJ exajoule - 10^{18}
 PJ petajoule - 10^{15}
 TJ terajoule - 10^{12}
 GJ gigajoule - 10^9
 MJ megajoule - 10^6
Joule (J) = énergie consommée par un appareil d'1W pendant 1 seconde (1 kWh = 3,6 MJ).
(1J = 0,000278 Wh)
 tep tonne équivalent pétrole

10^{18} EWh = 1 000 000 milliards de kWh
 10^{15} PWh = 1 000 milliards de kWh
 10^{12} TWh = 1 milliard de kWh
 10^9 GWh = 1 million de kWh
 10^6 MWh = 1000 kWh

1 W (électrique $P = U \cdot I$) = 1 volt x 1 ampère
 1 W (mécanique $P = F \cdot V$) = 1 Newton x 1 mètre/s
 1 masse de 1 kg = 10N

PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ 2021 EN FRANCE

Source : RTE

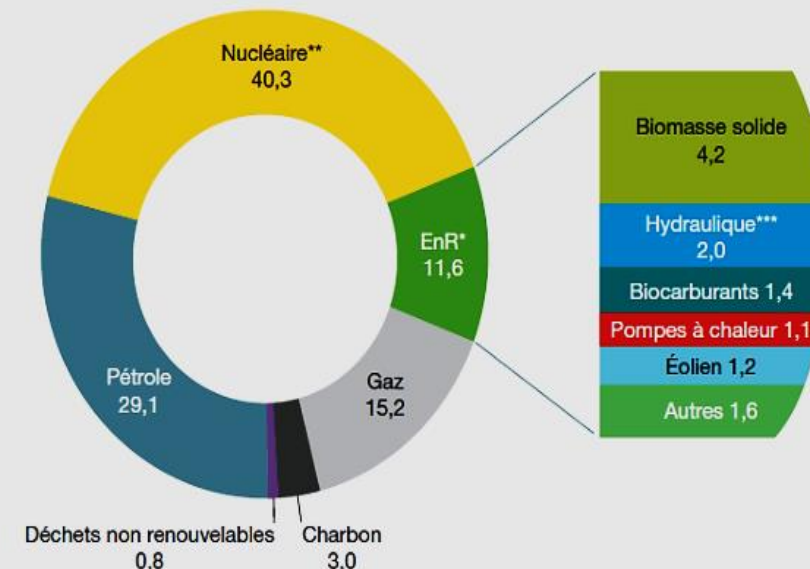


RENOUVELABLES ? (Hydroélectricité, Solaire photovoltaïque, Éolien et Bioénergies) :
128 TWh soit 24 % de la conso d'électricité française (529TWh). Objectifs Transition énergétique = **40 % dans le mix électrique en 2030 ?**

RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE

TOTAL : 245 Mtep en 2019 (données brutes)

En % (données non corrigées des variations climatiques)



En France l'Électricité = **48,8 % de l'énergie primaire totale** consommée

TWh (10¹²) = 1 milliard de kWh

Réchauffement climatique ?

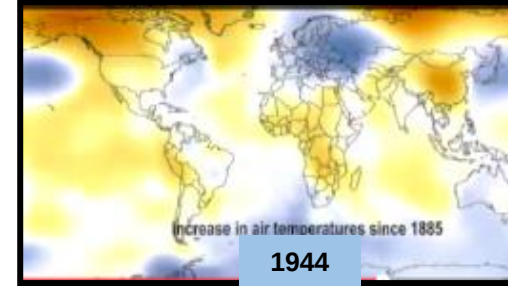
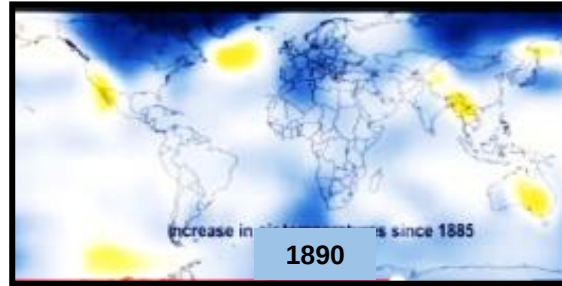
Modélisation du climat

70 modèles dans le monde (2 Fr)
Petits cubes tous les 100 km, avec lois physiques et chimiques (mécanique des fluides, composants comme planctons, chimie atmosphérique, cycle du carbone, etc.)

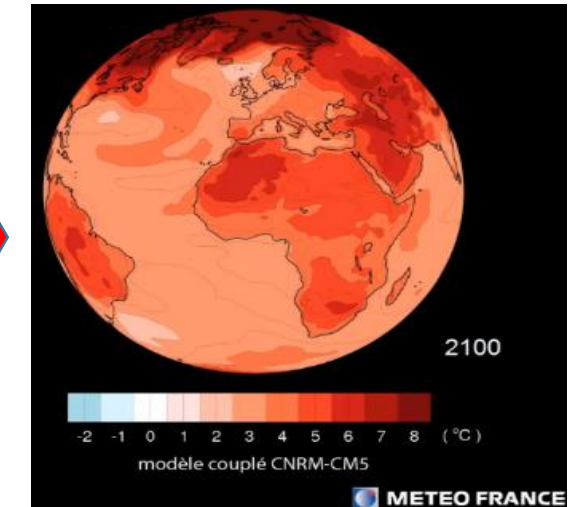
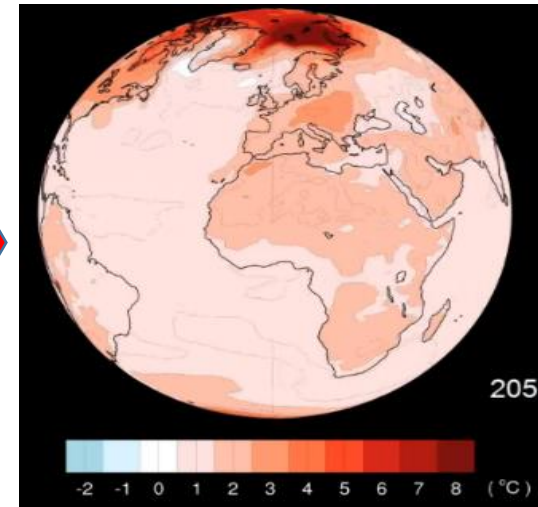
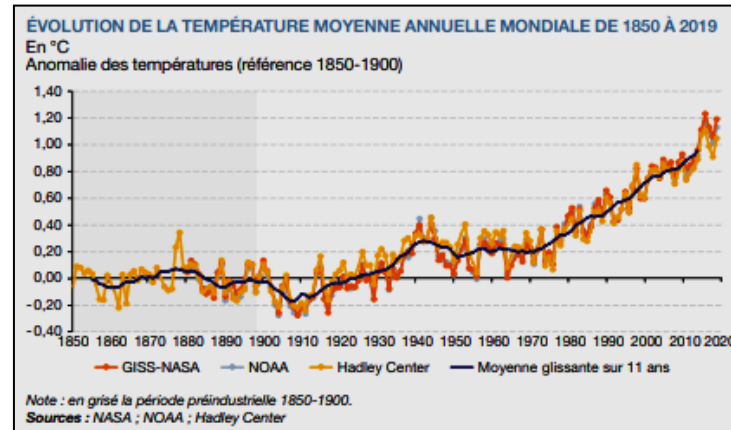
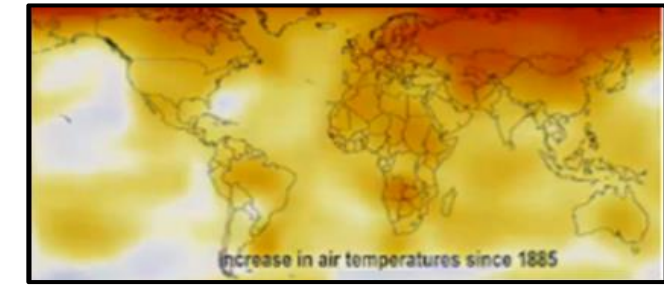
Observations du climat

Satellites, Bouées marines, Mesures climatiques marines et terrestres, etc.

+



Cycles du passé pour « vérifier » les modèles,

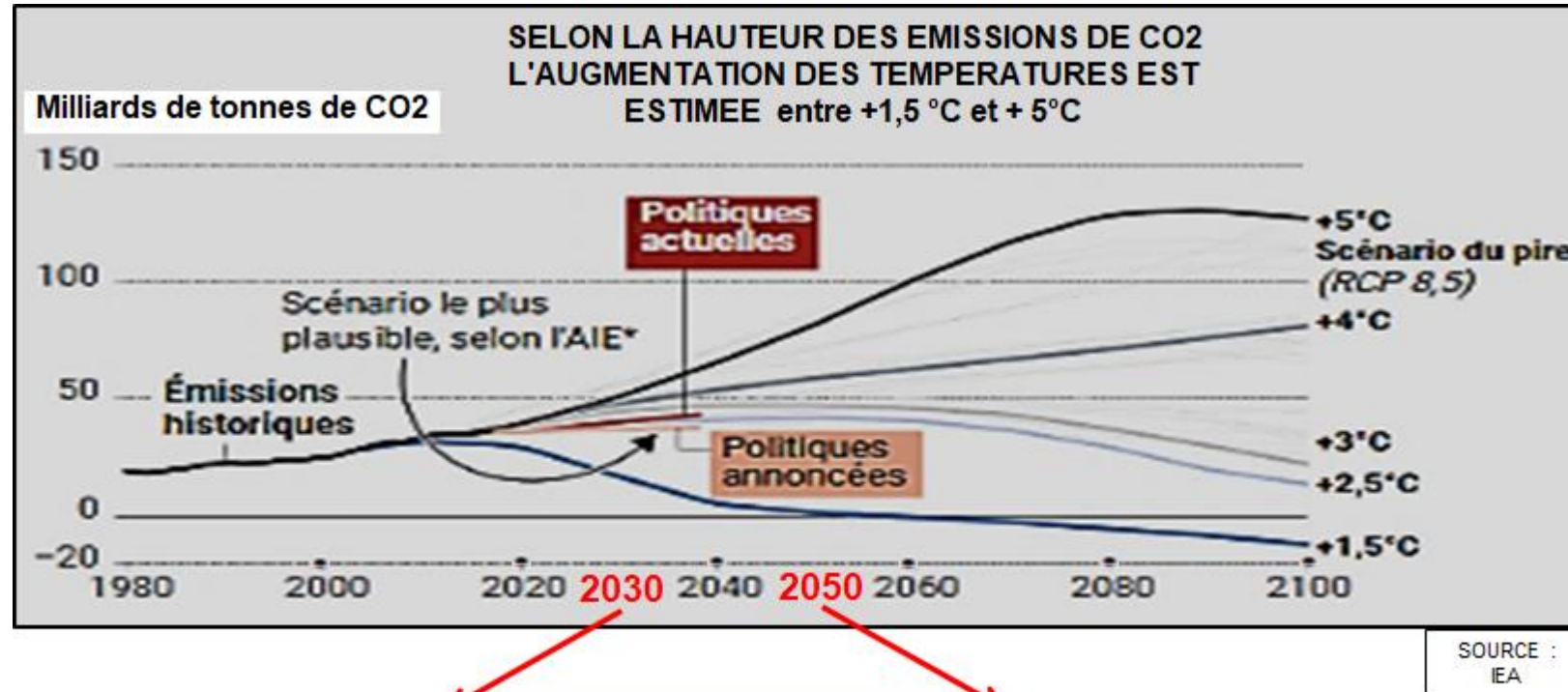


À noter en 2021 : lancement du "mini" satellite-OVSQ-SAT
Pour mesurer le bilan radiatif de la Terre : Flux solaire "entrant", Flux Terrestre "sortant", Flux "sortant" infra-rouge

Infos collectées depuis 2 ans après 11 000 révolutions...
Serviront à "recaler" certains modèles

PRÉVISIONS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE 2021-2100

Site d'info Climat :
Bonpote/CNRS,
(Kakemonos
325 000
abonnés)



**Conséquences dramatiques menaçant
notre civilisation...**

Fonte des calottes glacières ?

Au rythme actuel : 60000 ANS !

Si 100 fois plus vite : 600 ans...

Montée des océans d'ici 2100 ?

Si Groenland : montée de 6 m,

Si Antarctique : 60 m...

**Zone de danger de +2°C franchie
dans 22 ans (2030) ou 32 ans (2050) ?**

Extrêmes du Climat 1956-2021



Vagues de Chaleur



Inondations



Feux de Forêt

Sept 2022 : Le Premier Ministre de
Tuvalu (Pacifique) demande à la
Communauté mondiale de
considérer des "endroits" où sa
Communauté (100 000 personnes)
pourrait être accueillie à l'avenir...

Risque majeur - Élévation du niveau de la mer si > +2°C)



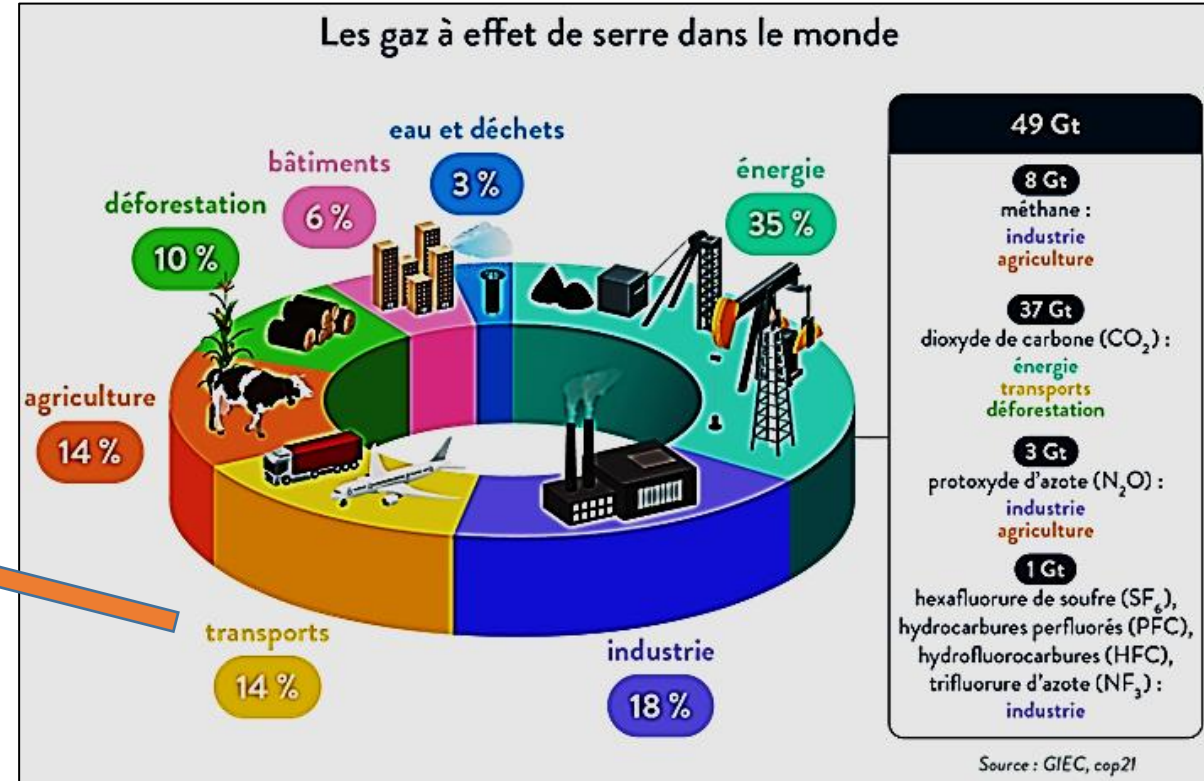
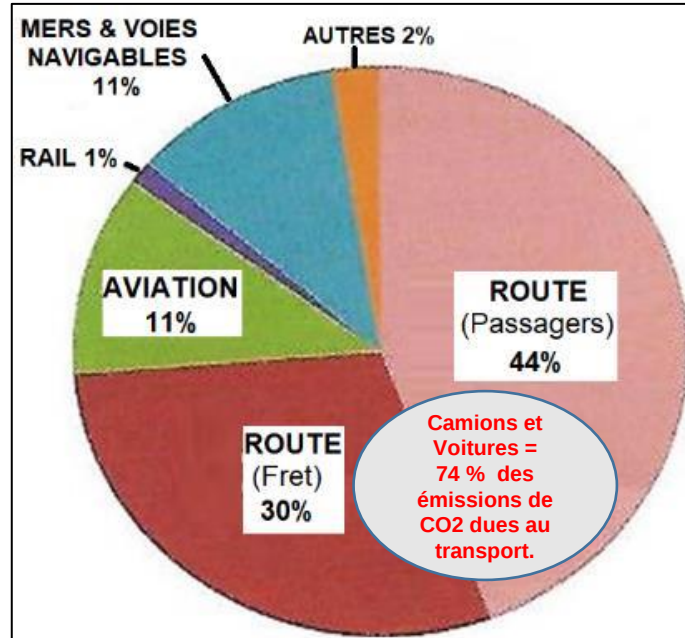
LE CO₂ LE GRAND COUPABLE ?

Parmi la famille des "Gaz à Effet de Serre", le CO₂ est considéré comme l'acteur principal

Dioxyde de carbone (CO₂), Méthane (CH₄), Protoxyde d'azote (N₂O),
Gaz fluorés [Hydrofluorocarbures (HFC), Perfluorocarbures (PFC), Hexafluorure de soufre (SF₆),
Ozone (O₃) de basse altitude, Vapeur d'eau (H₂O)

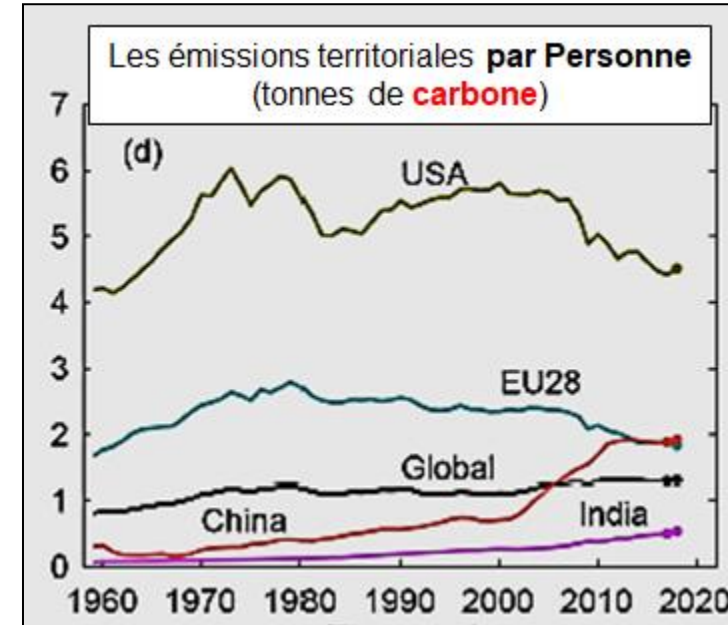
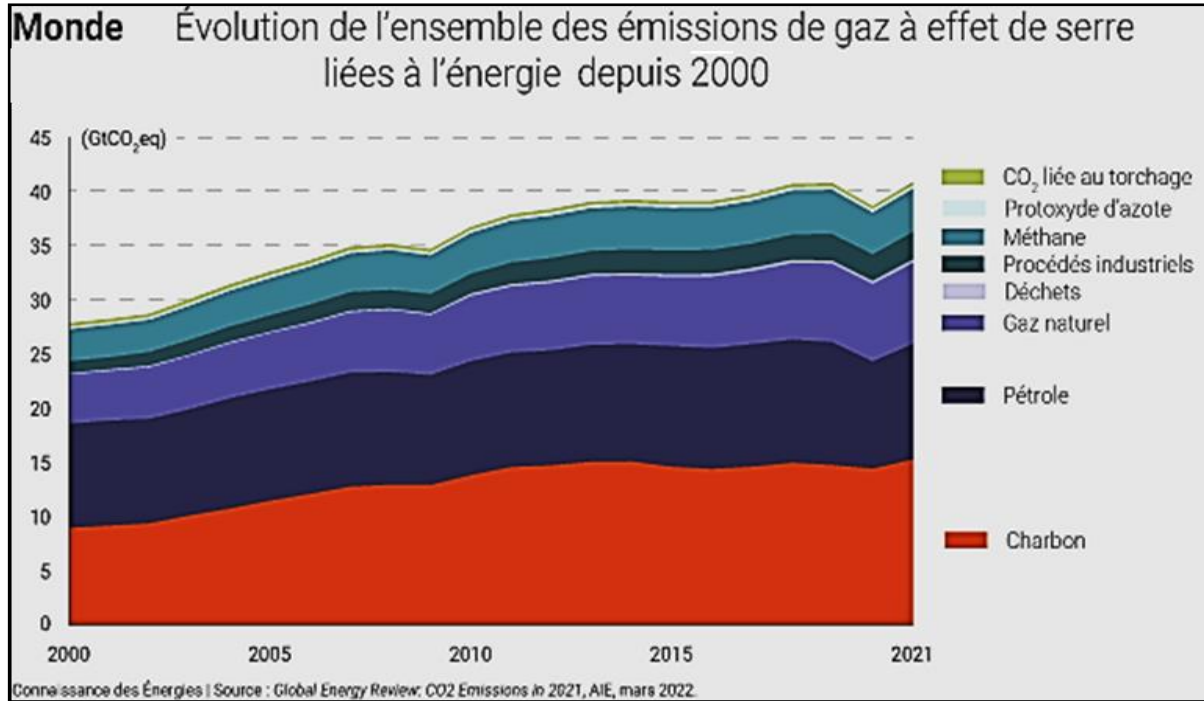
CO₂ 69% - Combustion énergies fossiles
Méthane CH₄ 24%, Agriculture, Élevage, Décharges, feux de forêts, etc.
Protoxyde d'Azote N₂O 5%, Engrais, déjections animaux, etc.

CO₂ : ÉMISSIONS MONDIALES par Secteurs



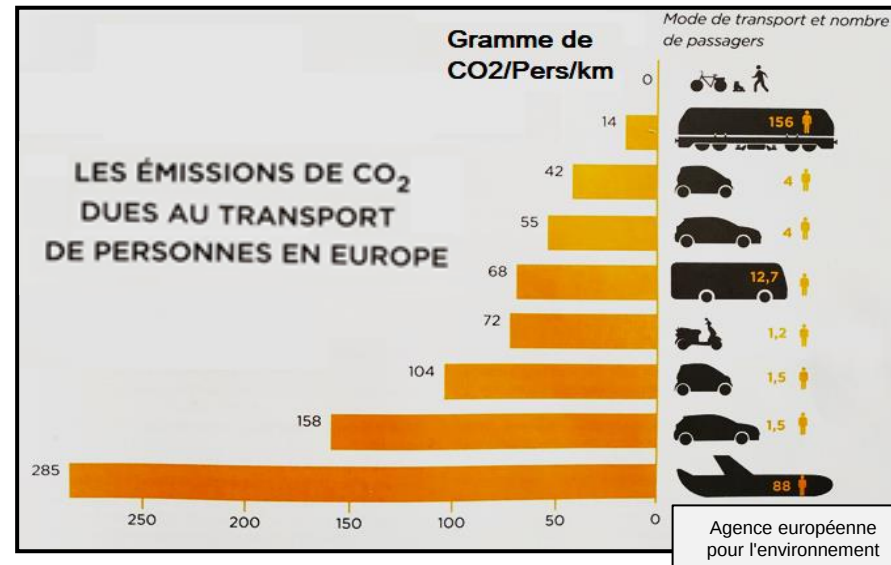
CO₂ par kWh ?

- Nucléaire : 6 g CO₂/kWh
- Éolien : 10
- Solaire : 44
- Gaz Nat : 443
- Charbon : 1058



→ Écart énorme entre un habitant des Etats-Unis d'Amérique, un Chinois ou un Indien...

France = 2% avec le CO₂ "importé" (1%)



La puissance que nous pouvons exercer avec nos bras et jambes est faible



"nos Esclaves énergétiques"



En moyenne Mondiale, l'Énergie mise en jeu par Personne et par an est de 20 000 kWh

En considérant qu'un "Esclave énergétique" moyen "utilise" 100 kWh/an, on peut dire que chaque Personne "utilise" 200 "Esclaves énergétiques"/an (600 pour la moy. Française)

CONSOMMATION MOYENNE / AN

(Appareils domestiques - France)

- Maison : 6826 kWh
- Appartement : 4233 kWh

ÉNERGIES PRINCIPALES

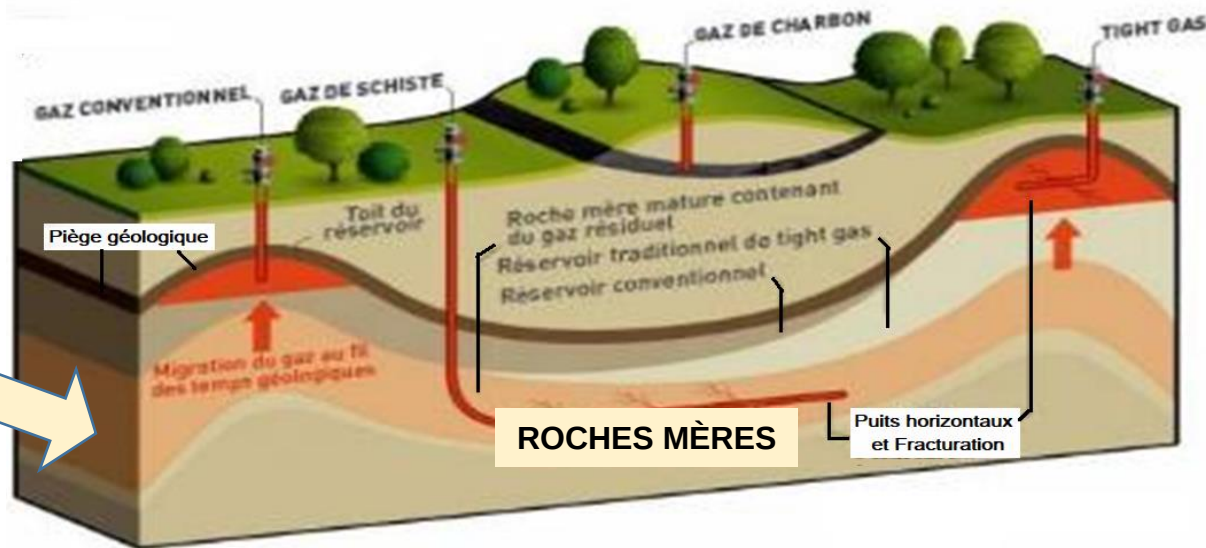
PÉTROLES et GAZ CONVENTIONNELS & NON CONVENTIONNELS

PÉTROLES et GAZ CONVENTIONNELS

RESSOURCES
assez importantes pour **durer 130 ans** au rythme actuel de production.

MAIS...

Les **ROCHES MÈRES** ont un potentiel **du même ordre de grandeur** que les gisements conventionnels exploités depuis les débuts de l'industrie pétrolière



CHARBON & BIOMASSE restent les sources d'énergie «incontournables» pour beaucoup de (grands) pays...

CHARBON & TOURBE

La génération d'électricité dans le monde utilise les énergies fossiles à hauteur de 67%...dont 39% pour le charbon

Autour de 170 ans de Réserves de Charbon...

BIOMASSE

Bois, Cultures dédiées, Coproduits et Résidus de Cultures & Résidus de diverses activités

9,3 % des Énergies Primaires dans le Monde
(hors : Hydroélectricité 2%, Solaire/Éolien 2%)
Energies essentiellement issues du Bois de chauffage et Cuisine...

NUCLÉAIRE

Parc Mondial : fin 2021, **436 réacteurs** en service dans 33 pays, pour une puissance installée de **388,6 GW** (gigawatts)

France : 56 Réacteurs à Eau Pressurisée dans 19 centrales.

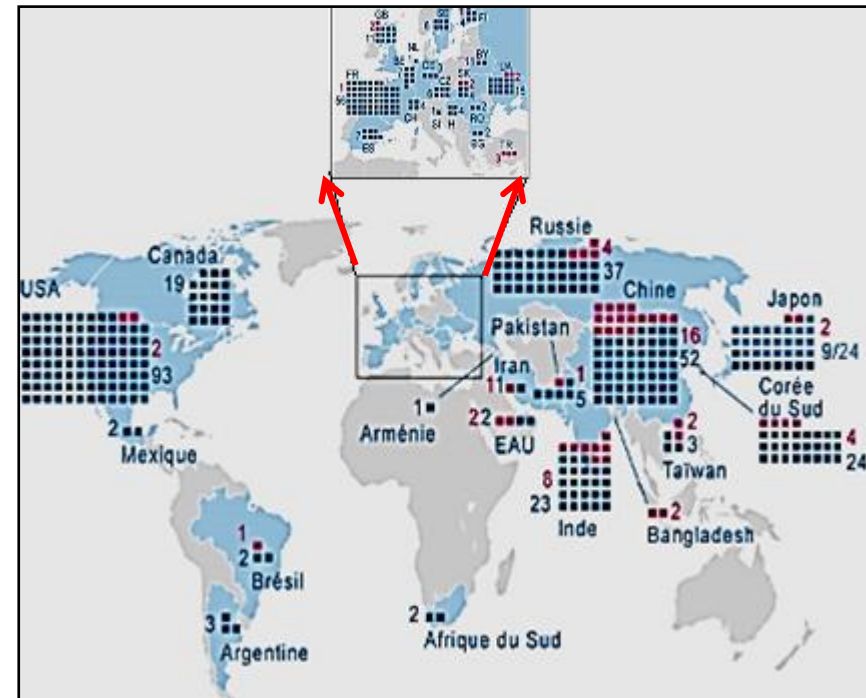
Rappel : 1 g d'Uranium peut produire autant de chaleur que 2,5 tonnes de charbon ou 1 tonne de Pétrole

Il faut 5,5 an en moyenne pour construire un réacteur nucléaire "classique"

5 réacteurs en construction en Europe

CO2 par kWh ?

▪ Nucléaire	6 g CO2/kWh
▪ Éolien	10
▪ Solaire	44
▪ Gaz Nat	443
▪ Charbon	1058



Combien d'éoliennes pour remplacer 1 EPR de 1600 MW ?

1280 éoliennes de 5 MW (25% de rendement)
Coût : 10 milliards € (si terrestre), ou 15 milliards € (si offshore)

Fessenheim fermée depuis 700 jours : 22,4 TWh auraient pu être produits...soit la production de 6200 éoliennes (de 3 MW chacune)...

Combien a-t-on économisé en Importations de Pétrole entre 1973 et 2022 (49 ans) ?
= environ 1464 Milliards d'€ en 49 ans !

Total Déchets produits depuis 50 ans = 1 670 000 m3.
Les déchets à vie longue et à forte activité (3,1 %) tiendraient dans 20 piscines olympiques
Pollution des nappes phréatiques ? Elles sont à - 20 m sous terre, le stockage est prévu à - 400 m...
En France, le **volume de déchets radioactifs produit /hab./an, est < 500 cm³**. En 2016, nous avons produit...
568 Kg de déchets ménagers/hab....

ÉOLIENNES

$24 \times 365 = 8\,760$ h/an ; facteur de charge 25% ; 2190 h ; Puissance captable du vent : $0,5 \times \text{Masse volumique air} \times \text{Surface cercle pale} \times V$ en m/s) ; rendement mécanique et électrique (η) 0,55

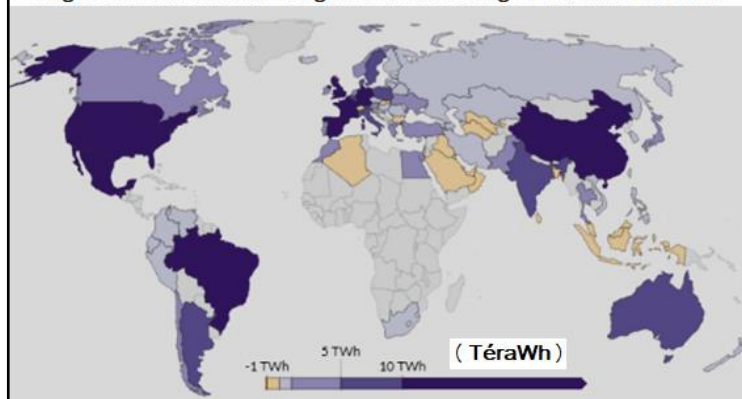
1 «ferme d'éoliennes» de 1 km² peut produire en moy. 46,9 GWh/an

(1 éolienne de 100 m = 3 MW, 13 éoliennes → $13 \times 3 \times 0,55(\eta) \times 2190(\text{h}) = 46,9$ GWh/an)

La surface "théorique" nécessaire à la **conso électrique annuelle de la France**

(529 TWh) serait de **11279 Km²** (soit 2,10% de la surface de la France...!)

Augmentation annuelle de génération d'énergie éolienne en 2019



France 2021 : 18,5 GW installés
France 2051 ; 37 GW ?

Monde : 570 GW supplémentaires
d'ici à 2027 ?

SOLAIRE

Le solaire "produit" 2 sortes d'énergies :

- * **Thermique** (chauffage d'eau)
- * **Électrique** (effet photovoltaïque)

la Terre reçoit du Soleil un rayonnement maxi (perpendiculaire) de 1 361 W/m², et en moy. 340 W/m² (effet rotundité) soit 1489 kWh/an/m² (12h/jour, 365 J) : si η PV 20% = 297 KWh/an/m²

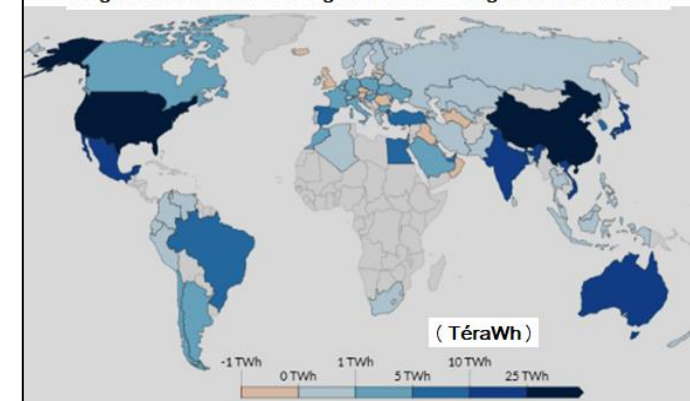
Un panneau photovoltaïque produit par an 297 kWh / m² (Rendement 20%)

La surface "théorique" nécessaire à la **conso électrique annuelle de la France**

(529 TWh) serait de **1781 Km²**

A noter que la surface des toits en France est de l'ordre de 10 000 Km²...

Augmentation annuelle de génération d'énergie solaire en 2019

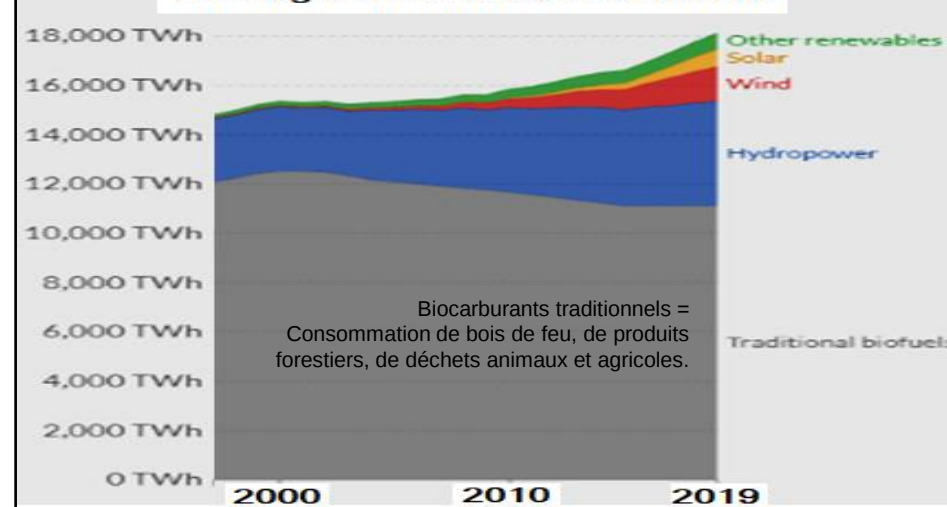


Maison 120m², 12 kVA, HP/HC
Conso élec moy. 18 796 kWh/an = 68 m² de PV...

Un système de panneaux photovoltaïques coûtait
\$106 / Watt en 1975,
\$0,20 aujourd'hui

La Chine contrôle 75% de la production mondiale de
panneaux solaires

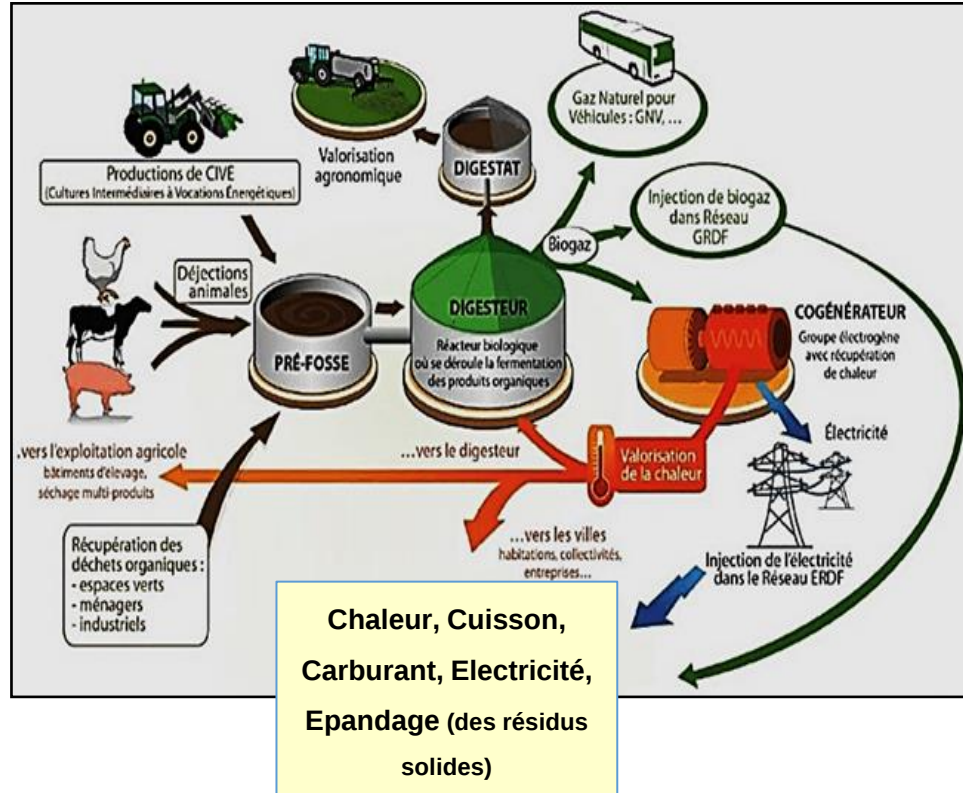
Consommation annuelle mondiale
d'énergies renouvelables en TWh



« Facteur de charge »

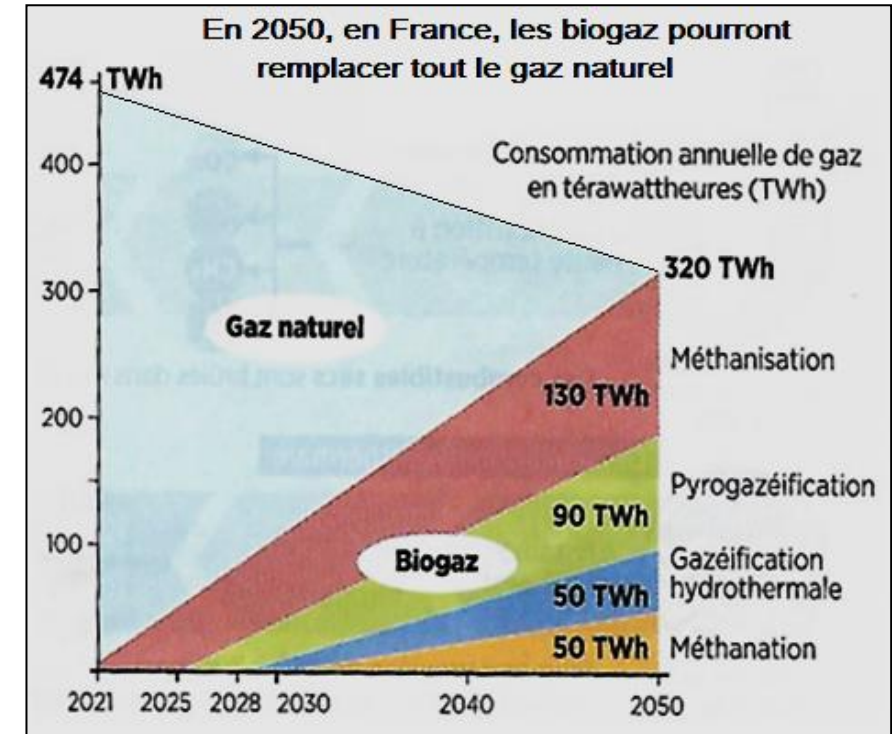
Éolien : Terrestre 22 à 25%, Offshore : 35%

Solaire photovoltaïque : 10 à 15%



Émissions de CO₂ du Gaz "vert" :
23,4 g CO₂eq/kWh
Soit 10 fois moins que le CH₄

Dans un **véhicule thermique** :
 Si 100% de E85, réductions : -
 - 80% de CO₂,
 - 93% de particules fines, - 30% de NO_x / au Diesel



Biométhane agricole
Prévisions France Gaz (2023)
 De 10 TWh en 2022 à
 100/110 TWh en 2050 pour une conso gaz totale de 350 TWh

- Méthanisation (digesteurs) → Biométhane
- Pyrogazéification (brûlage de déchets solides) → Méthane
- Méthanation (hydrogène "vert" + CO₂) → Méthane

L'Allemagne : 10 000 unités, d'où des teneurs en nitrates trop élevées dans 36 % des eaux souterraines et en phosphore dans 72% des eaux de surface.

Bois ? À noter qu'en 1 siècle, la forêt française est passée de 10 à 17 millions d'hectares (31% du territoire...).

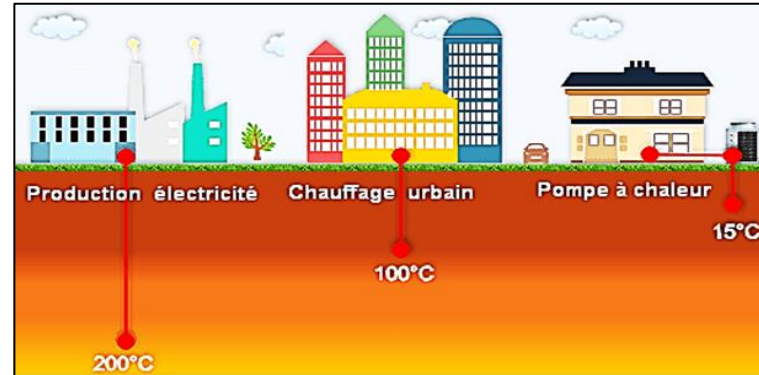
Les POMPES à CHALEUR ou la GÉOTHERMIE DOMESTIQUE

Puissance Géothermique profonde future en France
2023 : 2,9 TWh , 2028 : Option de 4 TWh à 5,2 TWh

3 types de « géothermie » :

- 1) On va puiser l'eau chaude dans les nappes du sous-sol plus ou moins profondément

(IdF 2022 : 200 000
maisons et 12 000 immeubles)



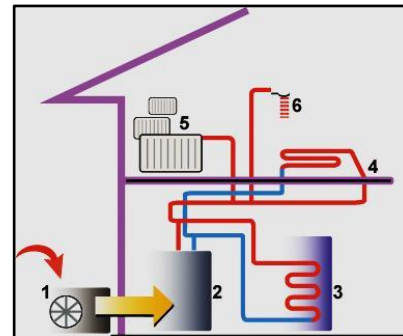
- 2) On capte la chaleur du sol sur 50 cm de profondeur = "puits canadien"



3) POMPE à CHALEUR :

On capte la chaleur de l'air extérieur (chauffage)
ou intérieur (climatisation)

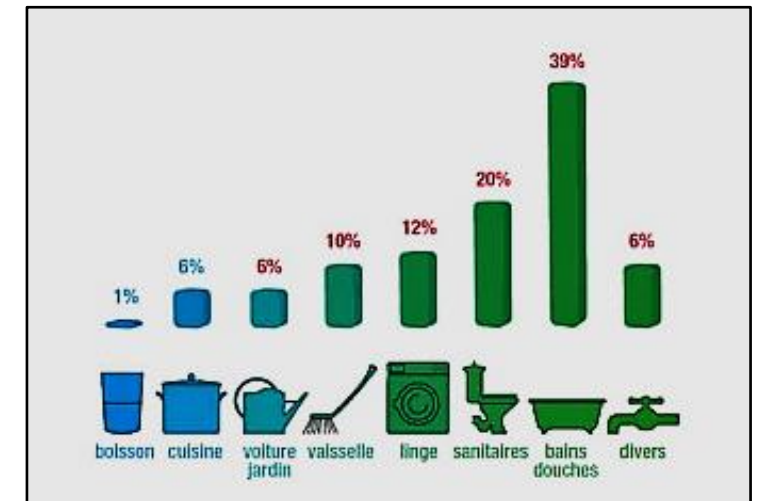
Plus de 200 000 pompes à chaleur géothermiques
fonctionnent en France (2021)



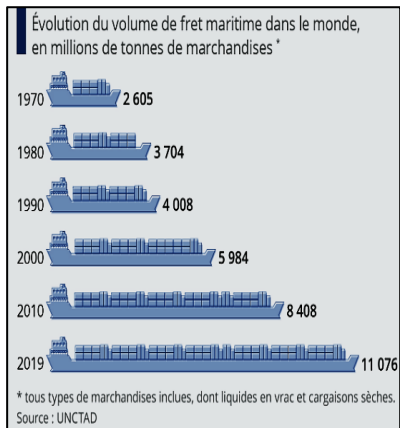
DESSALEMENT D'EAU DE MER

300 millions de personnes consomment de l'eau désalinisée dans le monde.

- Stress hydrique : en 2030, 3,9 milliards de personnes vivront dans un pays de stress hydrique.
- Cette solution pourrait garantir l'approvisionnement en eau de 40 % de la population qui vit à moins de 100 km de la mer.
- Coûts énergétiques ? :
 - ✓ L'eau "Normale" : 0,5 à 2,5 kWh/m³
 - ✓ L'eau désalinisée : 2,5 à 4 kWh/m³



LE TRANSPORT MARITIME



96.000 navires de commerce, 150 pavillons
> 1 650 000 marins
= 74 % du commerce mondial (biens et services)
et 90 % du fret mondial (12 Gigatonnes)
et 3% du CO2 mondial...

10 milliards de tonnes / an, transitent par la mer :
 Soit 80/90 % du transport international de marchandises

TRANSPORTS FERROVIAIRES

9,6 milliards de voyageurs dans l'Union européenne
21 milliards dans le Monde.



Les trains transportent 6,25% du trafic interurbain en Europe, 0,3% aux USA
50% en traction électrique, 40% en Diesel, 10% en vapeur

TGV : 39 000 km en Chine, 3 000 au Japon, 2 800 en France et en Espagne

LE TRANSPORT AÉRIEN

Passagers : 4,3 milliards de pers (2018)
 (Organisation de l'aviation civile internationale - OACI)

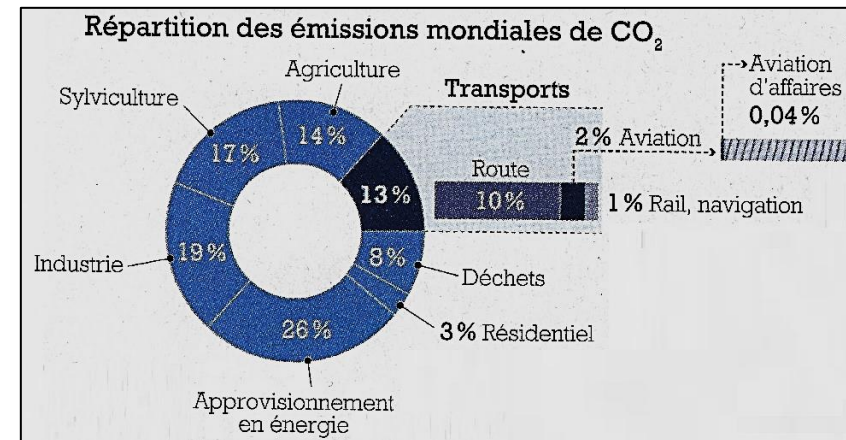
127 passagers/seconde
 montent dans un avion

Avions Civils : 27 000

Fret : 1 760

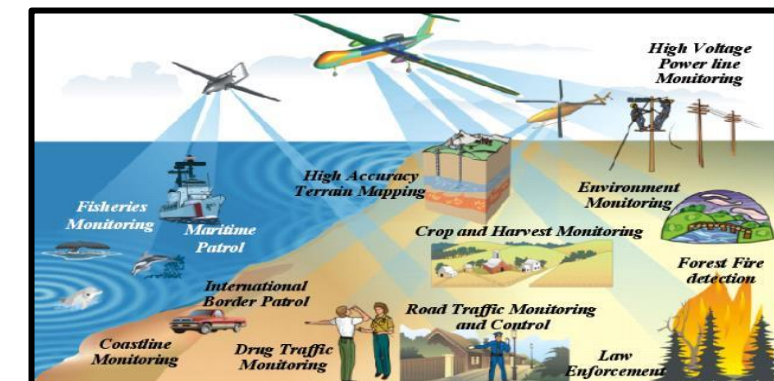
50 000 destinations,
100 000 vols journaliers

Fret = 0,1 % des navires...
850 fois moins...



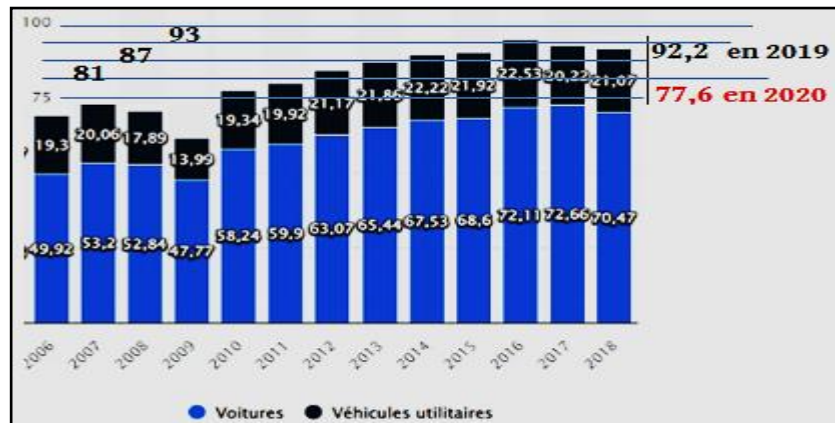
Émissions de CO₂
 En g/passager.km
 Moyenne aviation d'affaires : 1 300
 Moyenne aviation commerciale : 128

Drones de surveillance des activités humaines...ou guerriers...



LES TRANSPORTS ROUTIERS

Production Mondiale de Voitures particulières, Véhicules utilitaires (camions, autobus, etc.).



Parc Mondial actuel : 1,2 milliards de Véhicules
VP, Camions légers, moyens et lourds, Autobus.

Parc Automobile France

39,5 millions d'unités dont
32,7 millions
de véhicules particuliers.

84% des Ménages sont motorisés

47,5% : 1 voiture

31,1% : 2 voitures

5,3% : 3 voitures



6,1 millions
de véhicules utilitaires légers



92 000
cars et bus

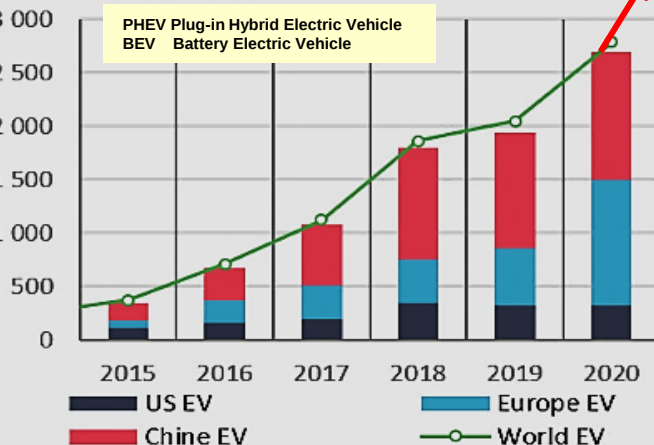


540 000
véhicules industriels

2022 - Part de marché du
Véhicule électrique = 9,8 %

Immatriculations VE (BEV+PHEV) Monde

milliers VE=PEHV+BEV



6,5 millions
en 2021

La filière automobile c'est

4 000
entreprises industrielles
qui emploient

400 000
salariés en France

un chiffre d'affaires de
155 Md€
soit 18% du chiffre d'affaires
de l'industrie manufacturière

un volume d'exportation de
49 Md€

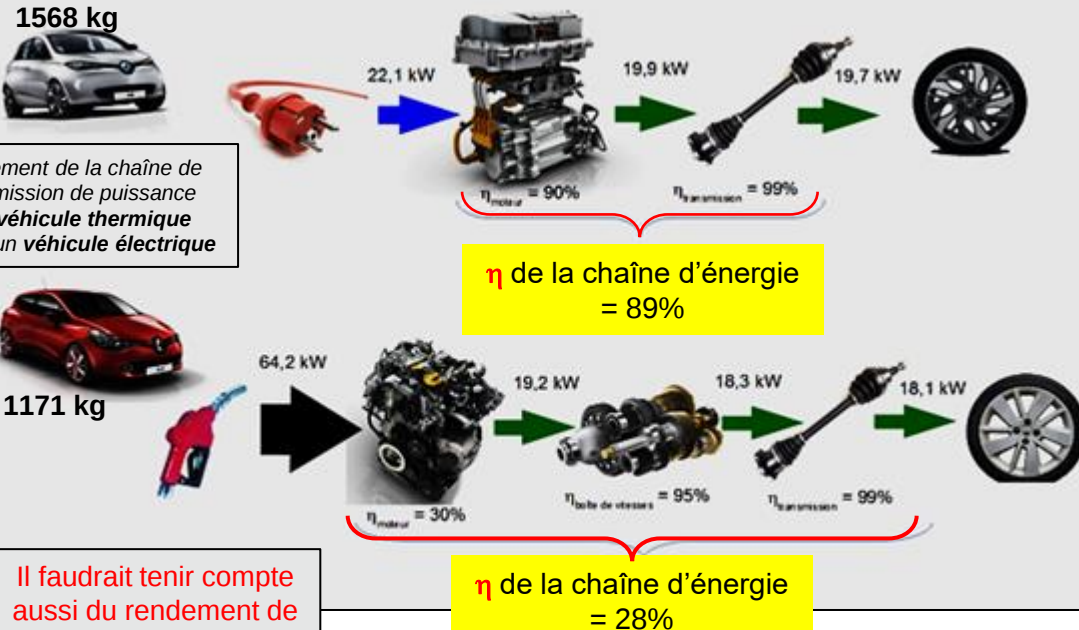
La MODE est aux VÉHICULES HYBRIDES et aux VÉHICULES ÉLECTRIQUES

EST-CE JUSTIFIÉ ?

PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle

BEV Battery Electric Vehicle

Aucun doute que le **RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE** est en faveur du véhicule électrique

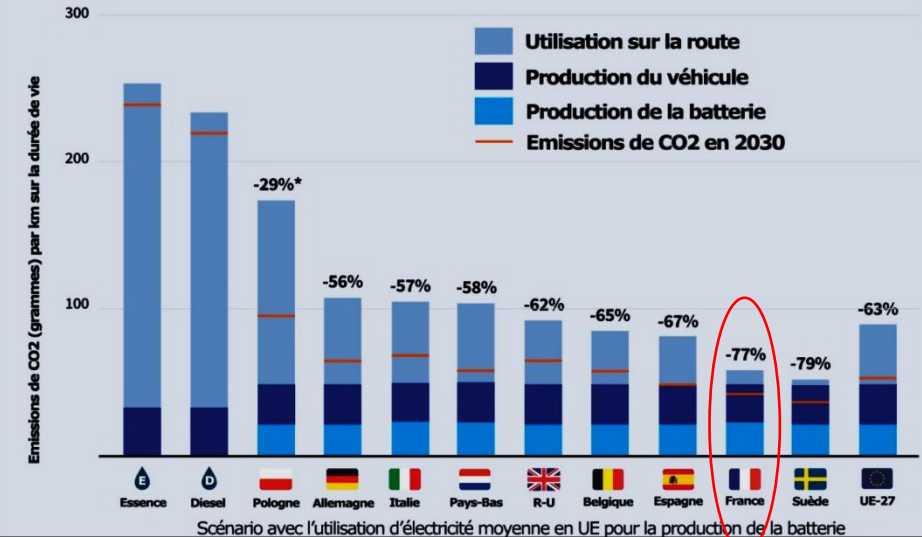


Rendement de la chaîne de transmission de puissance d'un **véhicule thermique** versus un **véhicule électrique**

Il faudrait tenir compte aussi du rendement de la production d'un litre d'essence ou d'un kWh d'électricité...

Ce qui se traduit par **MOINS** d'émissions de CO2...

En 2020, une voiture thermique émet en moyenne près de 3 fois plus de CO2 qu'une voiture électrique dans l'UE en 2020



Pays	Gr de CO2/Kwh	Kg CO2 pour 100 km (20 Kwh)
Suède	50	1 kg
France	66	1,3 kg
Belgique	260	5,2 kg
Espagne	320	6,4 kg
Royaume Uni	350	7 kg
Italie	410	8,2 kg
Allemagne	470	9,4 kg
Pays Bas	620	12,4 kg
Pologne	880	17,6 kg
Chine	850	17 kg

Évidemment, cela dépend du **MIX ÉNERGÉTIQUE** de chaque pays...

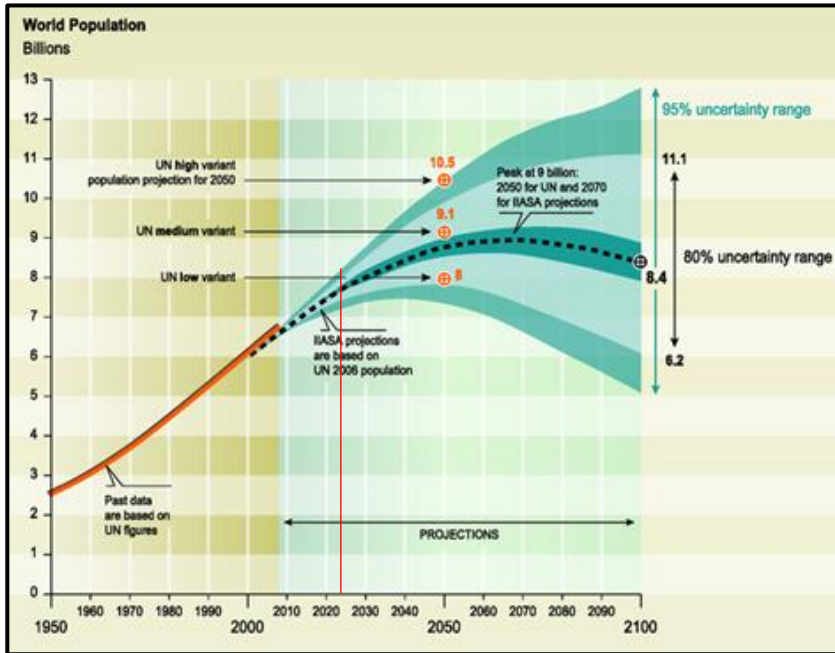
LES BESOINS ÉNERGÉTIQUES DU FUTUR VONT AUGMENTER !

POURQUOI ?

Au moins 2 PARAMÈTRES (liés) à prendre en considération :

- 1) L'Accroissement de la population
- 2) Les besoins de Mobilité

1) L'Accroissement de la population



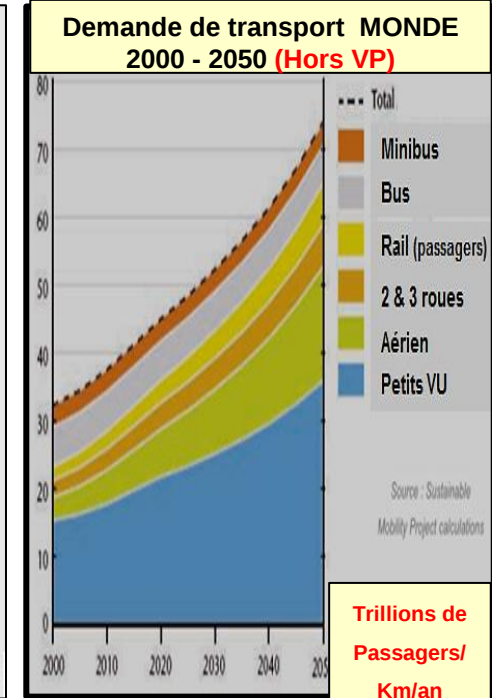
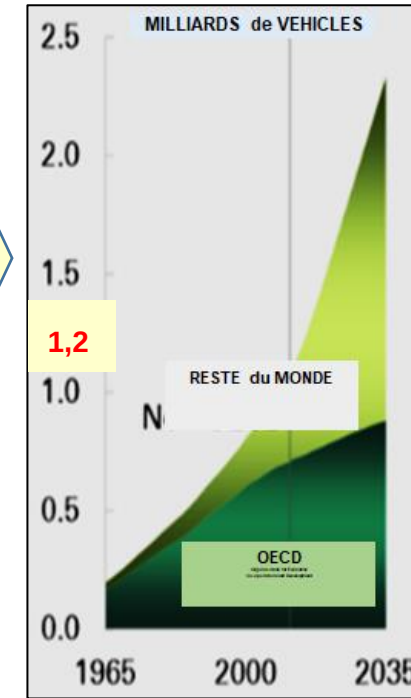
POPULATION CROISSANTE JUSQU'EN 2050 =

DEMANDES DE NOURRITURE, LOGEMENTS, ÉQUIPEMENTS,... EN CONSTANTE AUGMENTATION

ET

DEMANDES DE TRANSPORTS, EN CONSTANTE AUGMENTATION

2) Les besoins de Mobilité



selon les Nations Unies, le parc automobile mondial devrait atteindre **3 milliards de voitures d'ici 2050** alimenté à 80% par les économies en développement.



Les "moins"

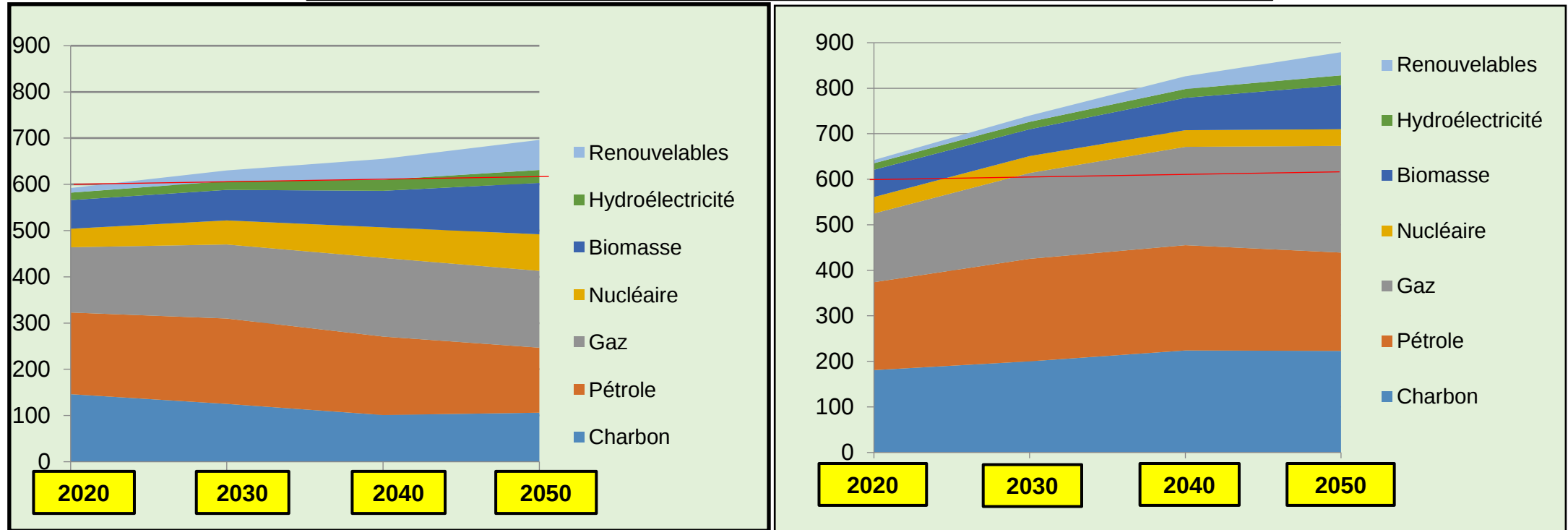
Taux de fertilité Monde 2022 = 2,3
Était 5 en 1960...

Les "plus"

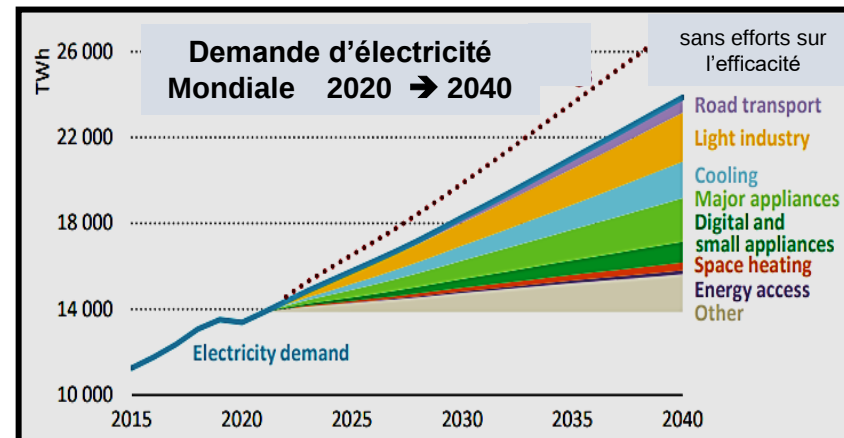
Augmentation de la Durée de Vie entre 1950 et 2010 :
+ 17 ans pour les Femmes
+ 15 ans pour les Hommes

CE QUI AMÈNE 2 "PROJECTIONS ÉNERGÉTIQUES" (DES SPÉCIALISTES) SUIVANTES (MINI-MAXI)

Total Énergies Primaires Monde 2020 → 2050' Unité : EJ/an Conseil Français de l'énergie, hypothèses "Jazz et Symphonie)



France 2022 - 2050
Gaz de 1600 TWh à 965 TWh ?
Électricité de 430 TWh à 645/752 TWh ?



QUE FAIRE ?

RENFORCER UNE SOURCE D'ÉNERGIE EXISTANTE OU EN PROMOUVOIR UNE AUTRE
NÉCESSITE DE CONSIDÉRER PLUSIEURS CRITÈRES DONT :

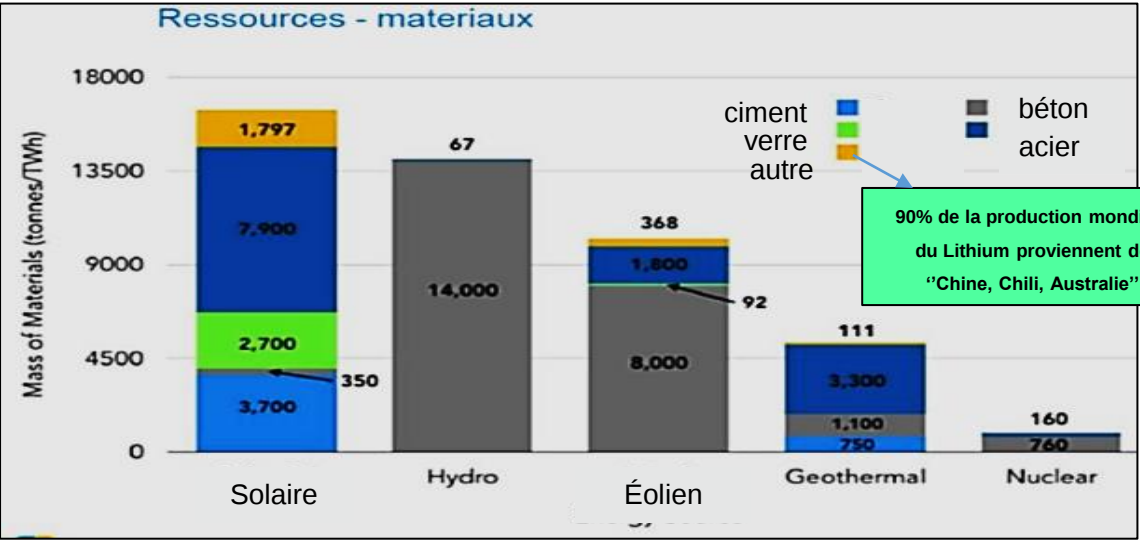
Le "Rendement surfacique" ...

Un paramètre crucial dans le choix entre les énergies !

A puissance identique, la surface terrestre nécessaire varie beaucoup selon le type d'énergie

- Flamanville : 1,2 km² pour 1600 MW
→ Si Éolien : 800 éoliennes de 2 MW
Avec 13 éoliennes par km² → 61 km² !
- Pour alimenter Paris en électricité : 308 km² de panneaux photovoltaïques ! = 3 fois la surface de Paris et 1/48ème de la conso française

Les besoins différents en Matériaux...



Combien "d'Acteurs" sont concernés ?

Il est plus facile de faire "agir" quelques centaines ou milliers d'acteurs que des millions ou des milliards !

Et bien sûr une étude économique sérieuse...!

QUELLE SURFACE DEVRAIT OCCUPER UNE ÉNERGIE "SANS CARBONE" POUR PRODUIRE LA DEMANDE MONDIALE D'ÉNERGIE ACTUELLE ?

- ❖ Éoliennes : 16,1 millions de km² soit 30 fois la surface de la France (550 000 km²)
- ❖ Solaire : 5,6 millions de km² 10 fois la surface de la France
- ❖ Nucléaire : 109 000 km² 0,2 fois la surface de la France

Facteur de charge, Pilotable ou pas, Durée de vie...

Type de "centrale"	Pilotable ou pas	Facteur de charge	g de CO2 / kWh	Durée de vie
Nucléaire	OUI	60 à 90 %	6	60 ans
Charbon	OUI	20 à 90 %	800/1000	40/60 ans
Gaz	OUI	20 à 80 %	400	40 ans
Hydroélectricité	OUI	25 à 50 % Selon Pays	6	200 ans
Éolien	NON	20 à 30 % à terre, 40% en mer	10	20/30 ans
Solaire	NON	10 % au nord, 15% au sud	20/50	30 ans

L'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) A CONSIDÉRÉ UNE DOUZAINÉ DE PARAMÈTRES SUR LESQUELS IL FAUDRAIT AGIR...

Le secteur de l'énergie est la source d'environ 75% des émissions de gaz à effet de serre. Il détient la clé pour éviter les pires effets du changement climatique (un grand défi auquel l'humanité est confrontée).



La loi de Pareto, ou principe des 80-20, affirme par observation qu'environ 80 % des résultats proviennent de 20 % des causes.
Vilfredo Pareto 1848 -1923 - Sociologue et Économiste italien.

PARAMÈTRES



Pas de nouvelles mines de charbon, centrales à charbon, ou nouveaux champs pétroliers

"Plus de" Véhicules électriques

"Plus de" Camions électriques

"Plus de fuels" bas carbone dans l'aviation

"Plus de" Renouvelables dont Solaire et Éolien

Bâtiments zéro-carbone

Production d'Hydrogène bas carbone par des électrolyseurs

Capture de CO₂

2020

2020 : 34 Gt

En 2021 **40 Gt** de CO₂ émises dans le monde.

2050

2050 : 2,9 Gt

RÉSULTATS SUR L'ENERGIE EN 2050



Renouvelables = 90% de l'électricité produite

Solaire / Eolien = 70% de l'électricité produite

Production industrie lourde = 90% à basse émissions

Bâtiments zéro-carbone > 85%

435 Mt d'Hydrogène bas carbone
3000 GW d'électrolyseurs

ÉMISSIONS MONDIALES DE CO₂ LIÉES À L'ÉNERGIE

Émissions totales de CO₂ = 0

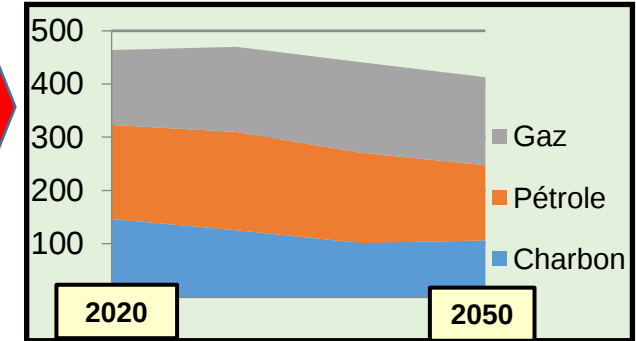
Remarque importante : Dans le schéma AIE, on espère éliminer **1,1 milliards de tonnes de CO₂/an**. Certains pensent que ce devrait être **6 milliards de tonnes/an**...d'autres, avec le **Projet "Drawdown"**, ont examiné et évalué **93 solutions** dans des secteurs "pertinents" et concluent à des économies potentielles de **43 milliards de tonnes de CO₂/an**...! Les propositions de l'AIE, bien que basses, sont déjà "polémiques" (certains y croient, d'autres pas), mais elles ont le mérite de refléter ce que beaucoup pensent qu'il faudrait faire...

EXAMINONS QUELQUES-UNS DES FACTEURS ÉTUDIÉS PAR L'IAE

Pas de nouvelles mines de charbon, centrales à charbon, ou nouveaux champs pétroliers ?

Le Conseil Français de l'énergie prévoit bien une baisse des énergies fossiles d'ici à 2050.

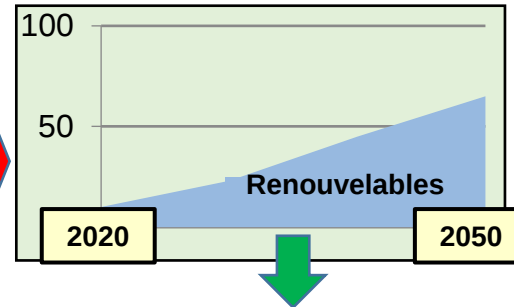
Mais les décisions dépendent des **offres** de certains États, des **demandes** des autres États et des **Consommateurs**...



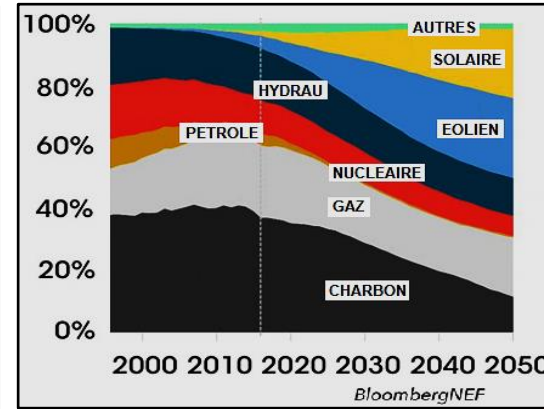
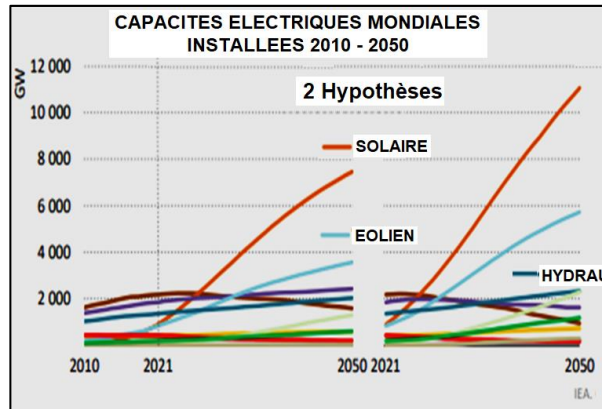
"Plus de" Renouvelables dont Solaire et Éolien

Le Conseil Français de l'énergie prévoit bien une augmentation du Solaire et de l'Éolien d'ici à 2050...

Cohérence avec objectifs IAE ?



2 prédictions mondiales (2020-2050) vont aussi dans ce sens



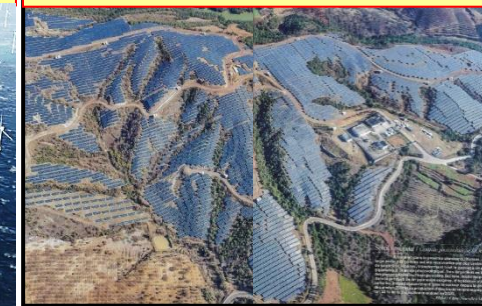
2 zooms !

Iles énergétiques
2 projets Danois pour 2030 ?



2023 : 2,8 GW d'éolien en mer
(= 3 réacteurs nucléaires)
2035 : 20 Gigawatts?
Une île énergétique ? 3 à 10 GW
Collecte l'électricité du champ d'éoliennes marines, fabrique de l'H₂ avec des électrolyseurs (carburant et ammoniac pour engrais)

Photovoltaïque en Chine
Province du Yunnan



Cf. Diapos suivantes

Stockage de l'électricité

Capture de CO₂

Production d'Hydrogène bas carbone par des électrolyseurs

Bâtiments zéro-carbone

Production industrie lourde à basse émissions

"Plus de" Véhicules électriques

"Plus de" Camions électriques

"Plus de fuels" bas carbone dans l'aviation

COMMENT STOCKER L'ÉLECTRICITÉ POUR RÉSOUDRE LE PROBLÈME DU DÉCALAGE ENTRE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ET LES BESOINS DE CONSOMMATION ?

LA PUISSANCE TOTALE DES STOCKAGES ACTUELS NE REPRÉSENTE QUE 2% DE LA PUISSANCE DE PRODUCTION MONDIALE...

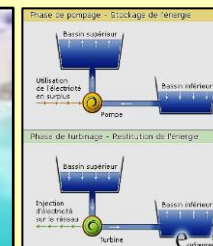
"Solutions" pour stocker l'électricité pendant les périodes de surproduction par l'énergie solaire, éolienne (ou même nucléaire)

- Exportation des surplus,
- Production d'H2 par hydrolyse de l'eau



BELGIQUE 2022 : 100 MWh (Li-Ion)

- Utilisation de packs de batteries (recyclées des voitures électriques,



- Utilisation de Sel, fondu par les rayons d'un "four" solaire,

- Pompage d'eau vers un point haut, The Azores: Combination "Wind/hydro Turbines"

- Régulation électrique à stockage inertiel (New York)



- Stockage dans des cuves d'électrolytes

Entreposage dans 2 réservoirs d'électrolytes. 200 kW délivrés pendant 4 h (avec 55000 litres..). L'Australie Sept... 2007

- * Stockage cryogénique (en Europe 50 à 250 MWh sur 5 h).

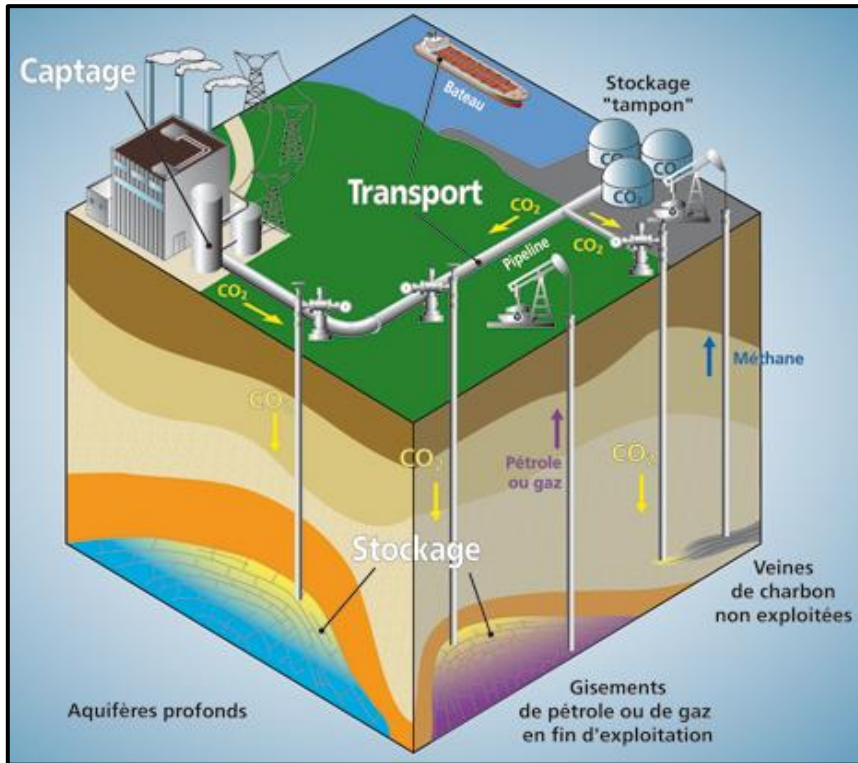
Air liquide puis état gazeux puis turbines = électricité.



Énergie de la marée : Usine marémotrice de la Rance (1967. P moy 57 MW = 3,5 % de la conso électrique de la Bretagne). Et les Hydroliennes

Batterie au CO2 ? = le CO2 (énergie produite par du renouvelable) est liquéfié (70 bars-31°C) puis réchauffé et, sous pression (5 bars), fait tourner une turbine produisant de l'électricité.

CO2 émis par une Centrale ou une Entreprise



Seulement 26 Sites opérationnels :
Norvège, Saskatchewan, Canada, Algérie, Pays-Bas, États-Unis, Abou Dhabi... Et Quelques Projets européens...

Pour 40 millions de tonnes/an

Pour séquestrer 10 % des émissions de CO2 actuelles, il faudrait 1 000 projets de grande envergure, des centaines de sites sécurisés, des milliers de km de pipe-line et des milliers de navires pour transporter le CO2 liquéfié ou inerté...

Rentabilité économique ?

Stockage du CO2 ? :

- * dans des réservoirs de pétrole ou de gaz naturel en fin de vie
- * dans des veines de charbon profondes
- dans des aquifères salins

• Ou transformation en pierre !

CO2 dans l'air

Comment piège-t-on le dioxyde de carbone

Principe de fonctionnement du dispositif Climeworks

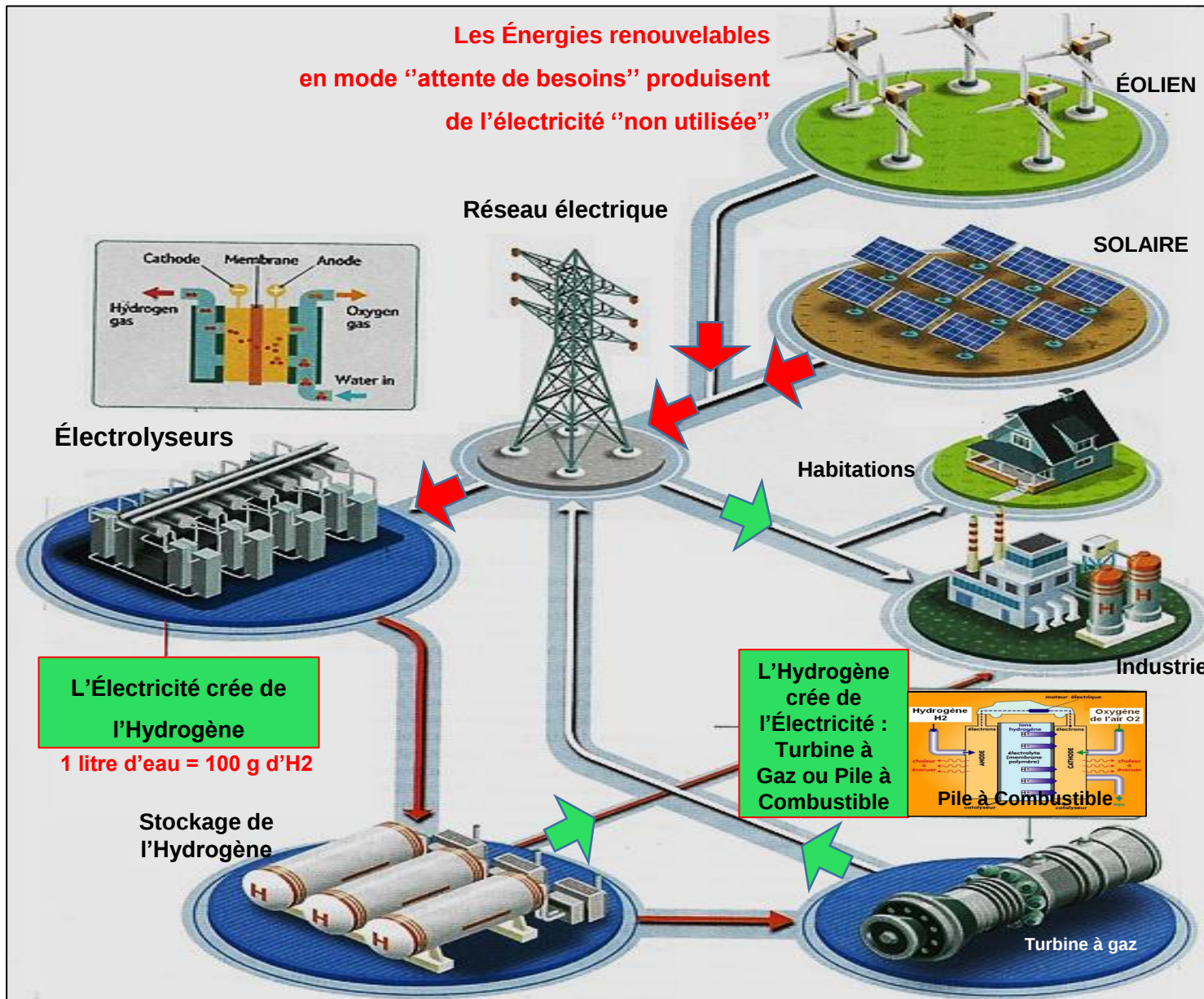
1. L'air est aspiré par un ventilateur dans un collecteur de CO2.
2. Un filtre retient le CO2 et libère l'air purifié à l'extérieur.
3. Une fois le filtre rempli, le CO2 collecté est mélangé à de l'eau.
4. Le mélange eau-CO2 est ensuite injecté sous terre.
5. Au contact du basalte, le CO2 se transforme en pierre en quelques années.

* ENTRE 100 ET 2 000 M
SOURCE : CLIMWORKS

L'ÉCONOMIQUE

UN "SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE COMPLÉMENTAIRE" BÂTI SUR L'HYDROGÈNE ?

= PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE PAR DES ÉLECTROLYSEURS



Énergie libérée par la combustion d'1 g de combustible (en kJ)



1 kg d'eau = 100 g d'H₂

1 kg d'H₂ = autant de km qu'avec une batterie de 100 kg

La Commission Européenne envisage que la "fourniture" d'énergie sera assurée par **80% de renouvelables en 2050**, adossée à **50 gigawatts d'Électrolyseurs** (soit l'équivalent de **50 réacteurs nucléaires...**).

Le prix de production de l'H₂ devrait passer de 4 \$ à 2 \$/kg

PIIEC : Projet Important d'Intérêt Européen Commun

15 projets français sélectionnés dans ce cadre.

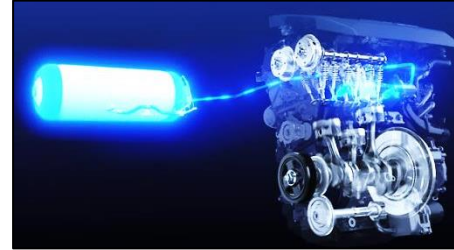
REVENONS À L'HYDROGÈNE

Supposons que l'Hydrogène soit produit de façon VERTE



On peut alors l'utiliser de plusieurs façons :

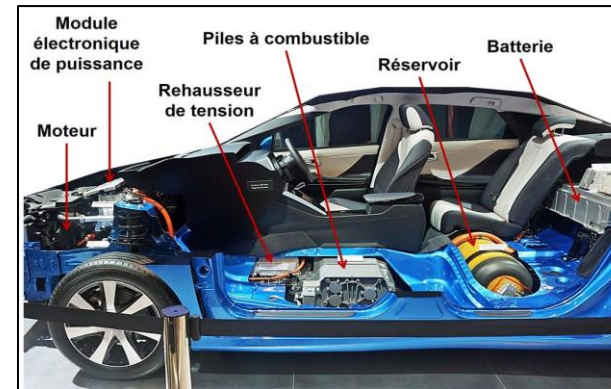
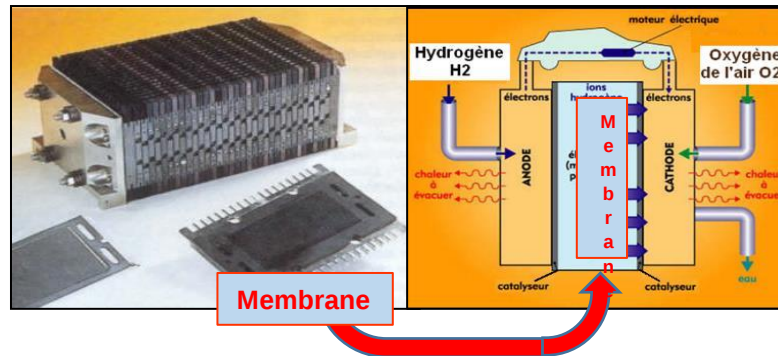
- Le brûler comme un gaz dans une turbine ou un moteur thermique



Le moteur à H₂ émet seulement de la vapeur d'eau...

- Le combiner avec du CO₂ pour faire du **Carburant de synthèse** (Méthode Fischer Tropsch)
- Produire de l'électricité via une **pile à combustible hydrogène**, pour alimenter des **moteurs électriques**

Émission de vapeur d'eau seulement...



2 Types de Réservoirs :

- H₂ liquide cryogéné (- 252 °C)
- À très haute pression (700 bars)
→ 400 à 500 km d'autonomie
→ Stations services spécifiques
(France : 225 en 2025 ?)
→ Plein entre 3 et 5 mn

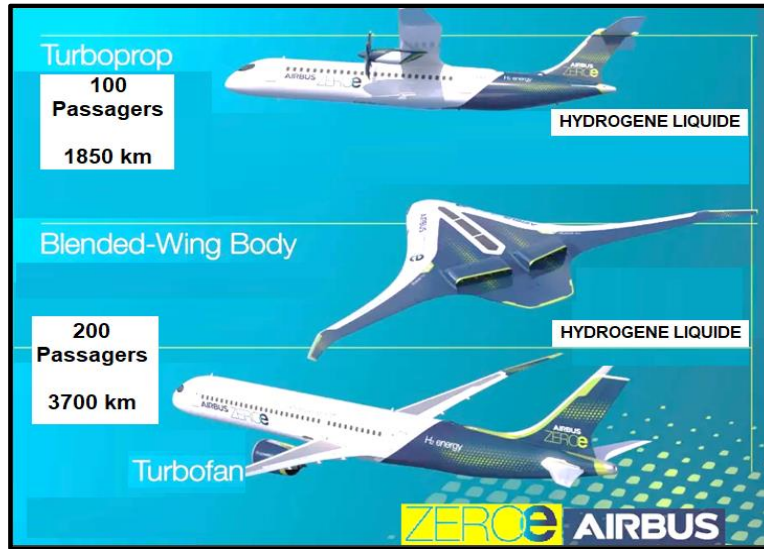
ATTENTION : Certains disent que si on veut remplacer tous les carburants routiers par de l'hydrogène, il faut doubler la production électrique !

En France = 54 **nouveaux réacteurs nucléaires**, ou **80 000 éoliennes**, ou la moitié de la surface de la Corse recouverte de **panneaux solaires**...



DES AVIONS À HYDROGÈNE ou ÉLECTRIQUES ?

- Airbus a fait de l'avion à H₂ un "axe stratégique majeur".
- Les avions à H₂ sont viables sur les vols court et moyen-courrier.
- 1/3 du trafic passager mondial à compter de 2035 ?



Neutralité carbone en 2050 ? 400 millions de tonnes de kérosène à remplacer...

- 4,5 milliards de passagers en 2019, produisant près de 3% des émissions mondiales. Doublement d'ici 2050 ?
- Les avions à H₂ en 2050 = émissions du transport aérien - 31%.

Un Airbus à hydrogène pour 2035

Les turboréacteurs sont alimentés de deux façons

- 1 **Directement en hydrogène liquide** comme un moteur à combustion classique.
- 2 **En électricité** par des piles à combustible alimentées en hydrogène liquide.

deux turboréacteurs
Autonomie : plus de 3 700 km
Capacité : 120 à 200 passagers
Vitesse de croisière : 825 km/h
Entrée en service : d'ici à 2035



- Il faut de l'H₂ "propre" = produit par électrolyse de l'eau avec une électricité issue de sources renouvelables (H₂ vert).
- L'H₂ vert est plus cher que le kérosène d'aviation (soutien financier des gouvernements ?)

AVION ÉLECTRIQUE ?

Les batteries stockent 0,150 kWh/kg
1 kg de kérosène en contient 10 kWh (66 fois plus !) et il y a 140 t à 200 t de kérosène dans un A350 ...!

Attention les batteries "pèsent" autant chargées que déchargées... Contrairement au kérosène qui est consommé au cours du vol...)

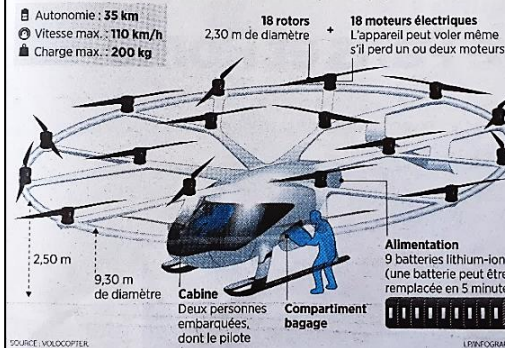
E-Fan : Biplace 100% électrique, 500kg.

2 Batteries lithium-ion, 65 kg-30 kW chacune, se rechargent en 1 h ; 160 km/h croisière, autonomie 45 mn / 1 h.



Les caractéristiques du Velocity

Le véhicule existe en version autonome et en version avec pilote (déployée au départ)



Piloté depuis le cockpit de l'avion, ce tracteur permet d'économiser 10% de kérosène

Ou, Electric Green Taxiing System = Moteurs électriques dans les trains d'atterrissage



- **Maison individuelle**
après 2023 seuil 4 kg CO_{2eq}/m²/an
- **Logement collectif**
En 2022, seuil 14 kg CO_{2eq}/m²/an
En 2025, seuil 6,5 kg CO_{2eq}/m²/an

BÂTIMENTS ZÉRO-CARBONE : Cas de la France

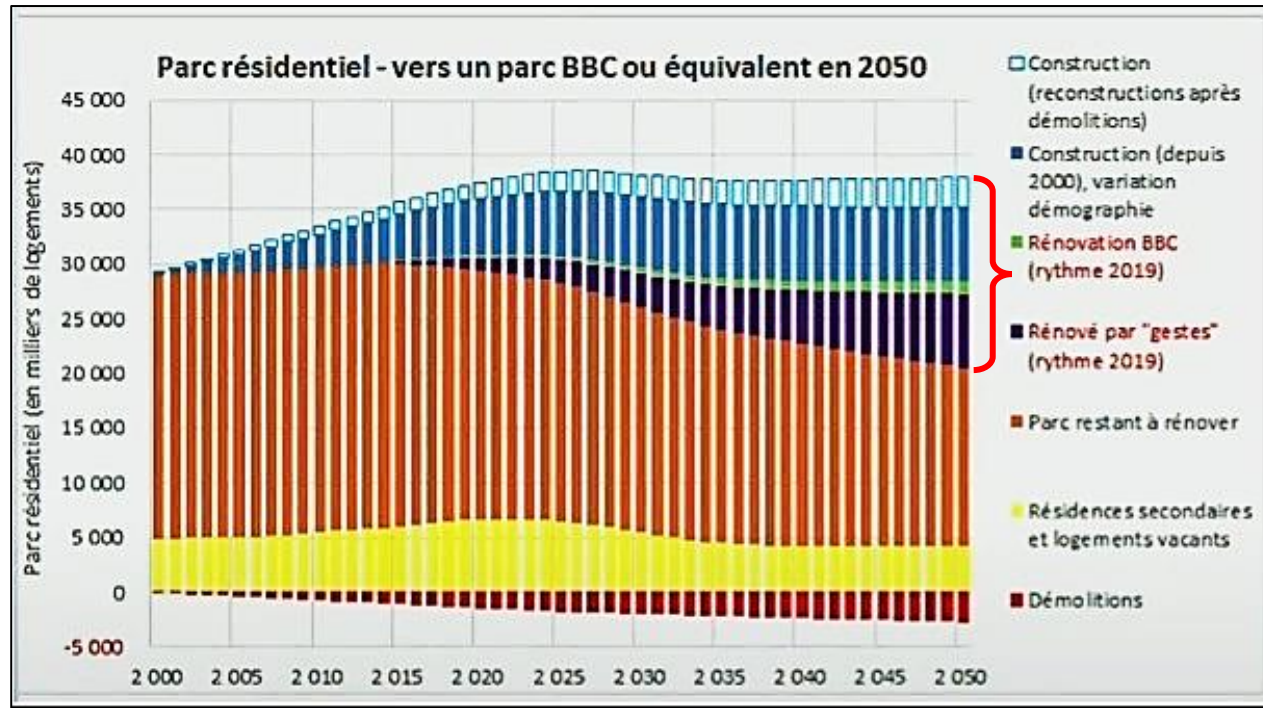
Des États, dont la **France**, subventionnent les rénovations énergétiques des bâtiments existants et des normes pour les nouveaux = **Bâtiment Basse Consommation**, ou **Maison passive** par ex.

La **Commission Européenne** souhaite promouvoir un **Label immobilier bas carbone paneuropéen**.
➔ encourager les recherches (et applications) sur les Matériaux et les Modes de Construction.

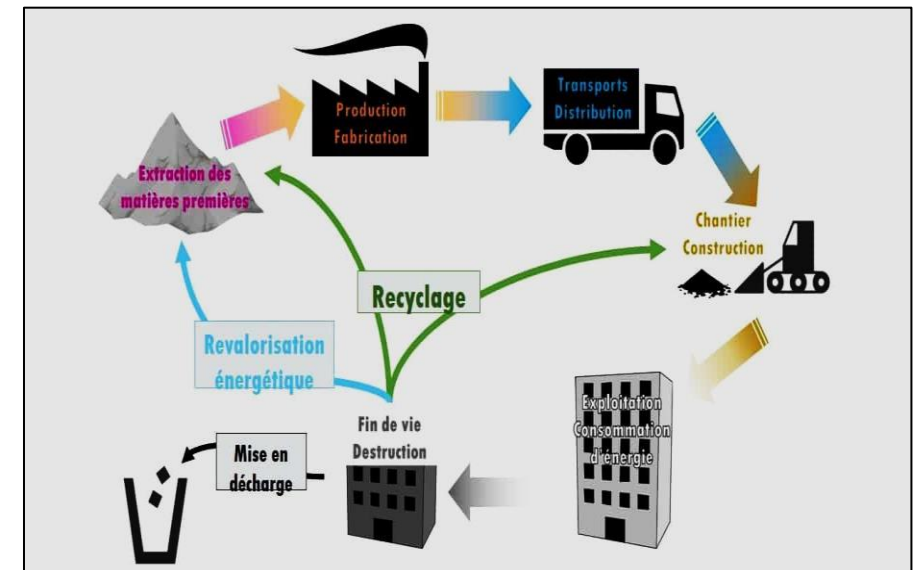
La **Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)** est la feuille de route de la **France** pour lutter contre le changement climatique. Ses orientations dans la rénovation des bâtiments

500 000 rénovations / an puis 700 000 /an ?

Bâtiments Résidentiels et Tertiaires = **baisse de 40% de la consommation d'énergie du secteur en 2050 comparée à 2021 ?**



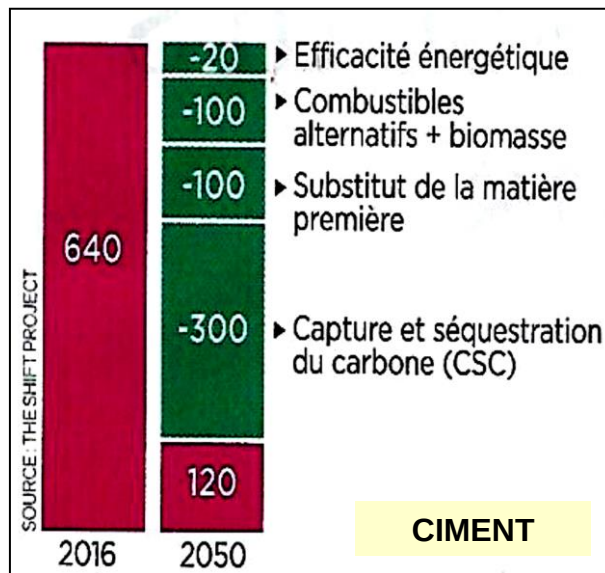
Parc Tertiaire Public = 380 millions de m² soit 37 % du parc tertiaire national.
L'État et ses opérateurs = 100 millions de m², Collectivités territoriales = 280 millions de m². Grand plan d'investissement = 4,8 milliards d'€.



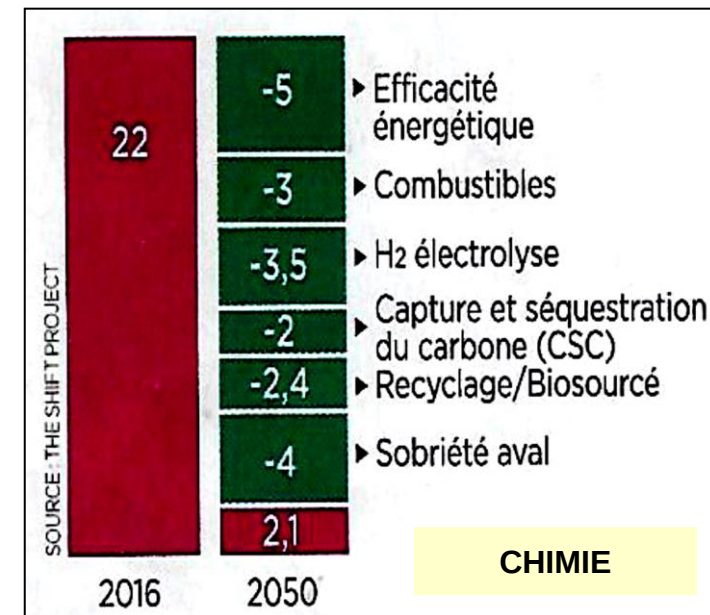
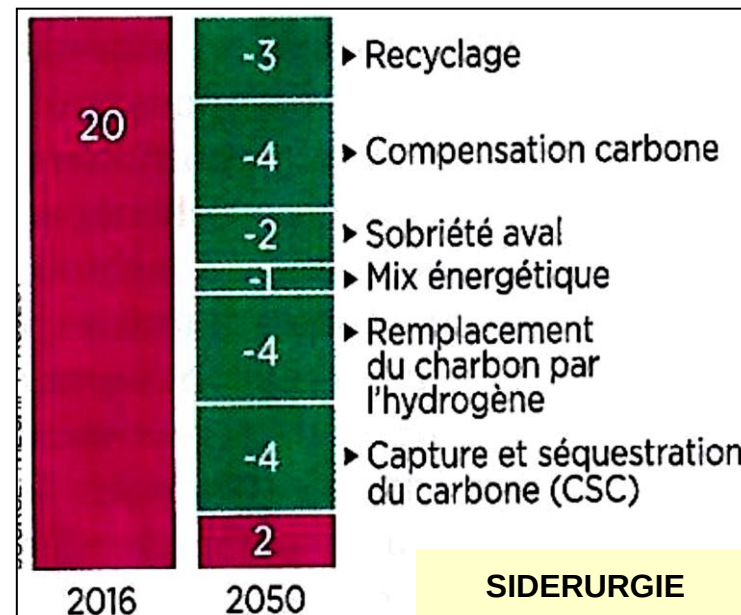
Recyclage des matériaux pour maisons/immeubles, standardisation de éléments de construction, immeubles "démontables" pour en faire des neufs !

On retrouve les **paramètres sur lesquels les Industriels veulent agir pour atteindre l'objectif des basses émissions** :

* Efficacité énergétique * Combustibles alternatifs * Hydrogène * Capture et séquestration du Carbone * Recyclage * Compensation carbone



3 EXEMPLES (Shift Project)

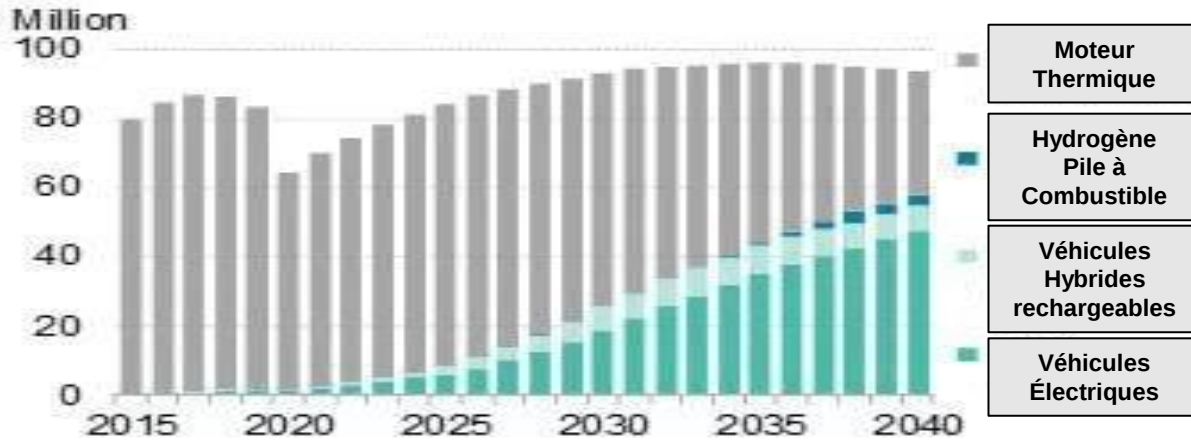


A noter : les "Acteurs" sont en nombres limités, ce qui permet les échanges entre eux des "best practices" et éventuellement de leur imposer des contraintes ...
Et certains des paramètres permettent des économies intéressantes pour la gestion d'une entreprise...

"PLUS DE" VÉHICULES ET DE CAMIONS ÉLECTRIQUES ?

© BloombergNEF

Ventes annuelles mondiales de Véhicules - 2020-2040

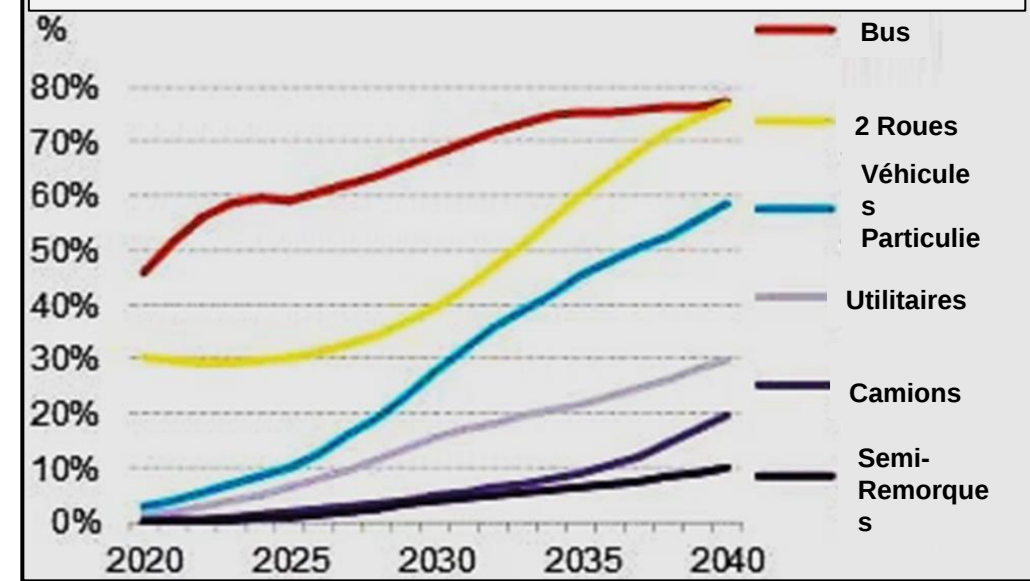


selon les Nations Unies, le parc automobile mondial devrait atteindre **3 milliards de voitures d'ici 2050** alimenté à 80% par les économies en développement.

L'Europe a décidé en 2022, l'arrêt des véhicules thermiques en 2035 !

Part de marché VE, Hybrides rechargeables et Hydrogène, par types de Véhicules - 2020-2040

BloombergNEF



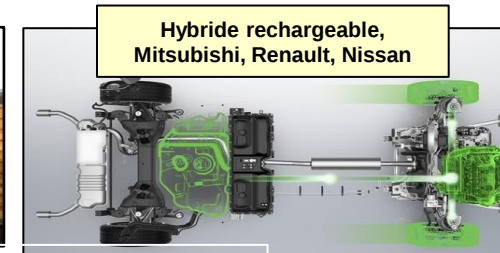
La majorité des Constructeurs automobiles ont entamé des programmes intensifs d'électrification de leurs véhicules.

Cela donne des prédictions 2020-2040 qui bouleversent le paysage automobile à cette échéance...

France : si 15 millions de VE en 2035...besoin de 2,5 EPR

Batteries : Fournisseurs Chinois et Coréens

Stellantis : 5 usines de Batteries d'ici 2035
1 usine = 23 GigaWh/an



Recharge VE ? :
UE 7 millions de bornes en 2030
Dont 1 million en France (60 000 en 2022...)

QUELLE EST LA "SOLIDITÉ" DES PRÉDICTIONS Véhicules Électriques 2020-2040 ?

COMPARONS LES + ET LES -

Atouts des voitures électriques

- Silence et Confort de conduite
- Fiabilité du véhicule
- Facilité d'entretien et de maintenance.
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre
- Absence de restriction de circulation

Sur l'ensemble du cycle de vie (**production / utilisation / recyclage**), l'Ademe estime qu'un **VE émettrait en moy. 44 % de moins de CO₂** qu'un véh. Diesel similaire et **63 % de moins** qu'un véh. essence.



Inconvénients de la voiture électrique

- **Impact des batteries : la production des batteries des VE pose des problèmes environnementaux et sociaux. ...**
Elles contiennent **des métaux rares**, comme le lithium, dont **l'extraction et le raffinage nécessitent énormément de produits chimiques** sur les sites de minage (Chine ou Congo)
- **La recharge reste une contrainte : temps de recharge et disponibilité des bornes. ...**
Le temps de recharge dépend de la **puissance disponible au point de recharge** :
Maison (3 kW) : 5 à 6 h pour recharger à 80% une batterie de 27 kWh...
Borne de 24 kW (parkings, supermarchés, stations-service...), 1h.
50 kW... 30 mn
Paris 2023 : 0,6 € / 15 mn + 0,55 € / kWh emmagasiné
- **Elle coûte cher à l'achat**
Les voitures électriques coûtent entre 30 000 € et 40 000€
- **Pour favoriser l'acquisition de véhicules plus propres et accélérer le renouvellement du parc automobile**, le **bonus écologique et la prime à conversion** ont été renforcés dans le cadre de France Relance (642 M€ de crédits décaissés entre janvier et juin 2021 - Budget dédié : 1,2 Md€).

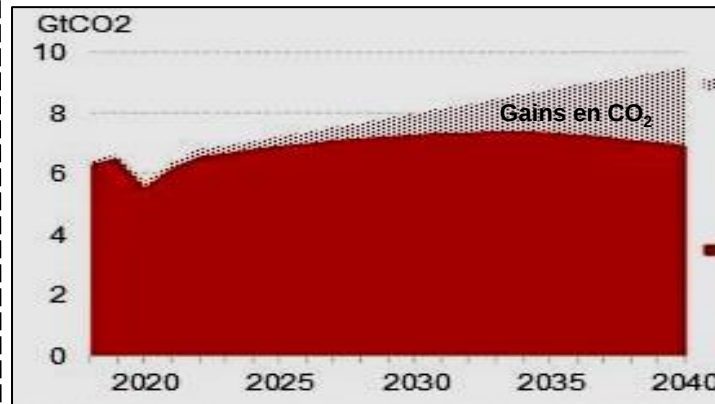
Mais, cela dépend de la situation énergétique de chaque Pays, = Électricité plutôt "verte", ou produite à l'aide d'énergie fossile comme le charbon ?



	CO ₂ /kWh	CO ₂ /kWh/100km
Suède	50	1 kg
France	66	1,3 kg
Belgique	260	5,2 kg
Espagne	320	6,4 kg
Royaume Uni	350	7 kg
Italie	410	8,2 kg
Allemagne	470	9,4 kg
Pays Bas	620	12,4 kg
Pologne	880	17,6 kg
Chine	850	17 kg

	CO ₂ /kWh	CO ₂ /kWh/100km
Suède	50	1 kg
France	66	1,3 kg
Belgique	260	5,2 kg
Espagne	320	6,4 kg
Royaume Uni	350	7 kg
Italie	410	8,2 kg
Allemagne	470	9,4 kg
Pays Bas	620	12,4 kg
Pologne	880	17,6 kg
Chine	850	17 kg

Si les plus l'emportent sur les moins, et si tous les Marchés évoluent vers les VE (Hybrides ou non), on peut espérer les gains annoncés par Bloomberg...

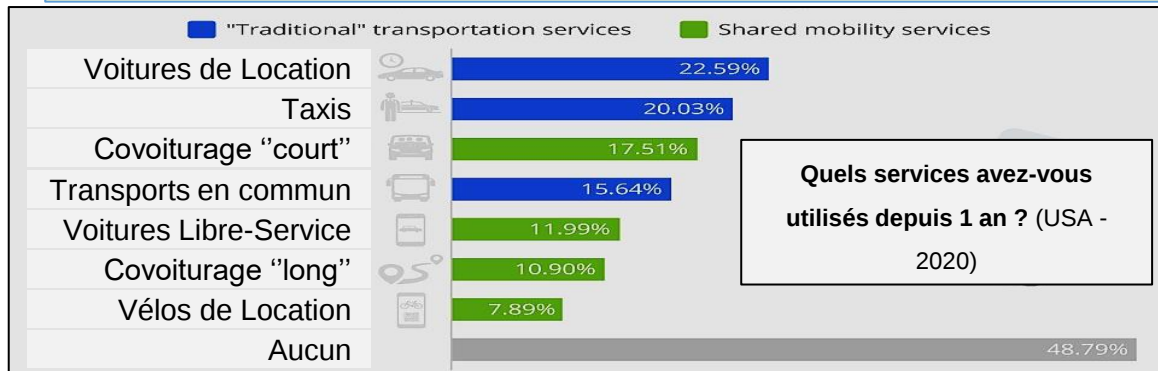


Autres paramètres en jeu en France, 2022 :

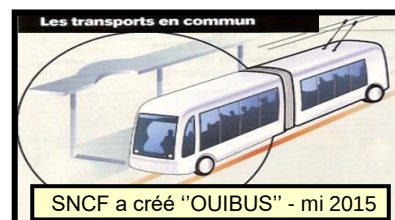
196 000 salariés dans l'automobile,
Fiscalité rapporte 80 Milliards d'€,
2 à 3 fois moins de main d'œuvre pour un VE
Va favoriser les constructeurs chinois ?

AUTRES MODES DE TRANSPORTS ROUTIERS

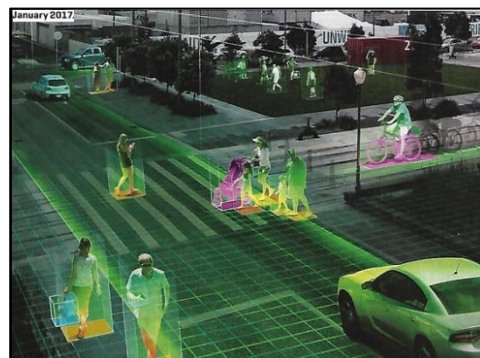
Partager la voiture ou partager le trajet ?



Avis, Europcar, G7, Taxis Parisiens, Zity, Ubeego, Sharenow, Getaround, Uber, BlaBlaCar...



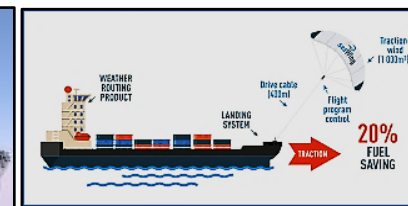
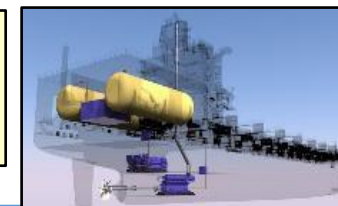
Quelques voitures 100% Autonomes en 2035 ?



FUTUR des BATEAUX ?

Trafic Cargo
X 3 en 2050 ?

- Gaz Naturel mieux que gasoil
- Pile à combustible possible
- Matériaux composites ?
- Apport des voiles ?



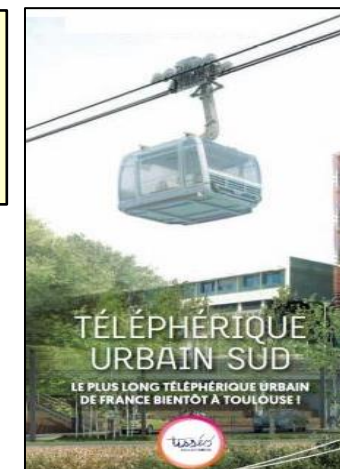
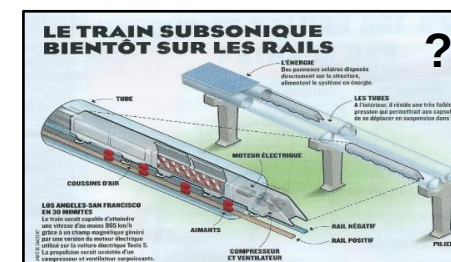
Maersk : 12 cargos au Méthanol en 2024/2025 (2% de sa flotte)
Gains : 10% conso, 60% rendement systèmes de propulsion, 70% NOx et 50% Particules
Attention Méthanol = neurotoxique !



Porte Containers électrique
(120 pour 3200 tonnes de fret). 24 km/h. 80 m de long, 15 m de large.
Opérationnel en 2024. Capacité totale de 6,8 MWh

FUTUR des TRAINS ?

- TGV : Consommation divisée par 2, 25% de places en +, tronçon central modulable, 2 étages ?.
- Récupération freinage ?
- Composites (non-structuraux à ce jour)



AUTRES
FACTEURS NON ÉVOQUÉS PAR L'IAE

NUCLÉAIRE FUTUR

Monde : **57 Centrales en cours de construction**

France : **6 à 12 EPR nouveaux ? 6 EPR = 60 milliards d'€**

Japon : 22% du mix électrique en 2030 ? (15 centrales)

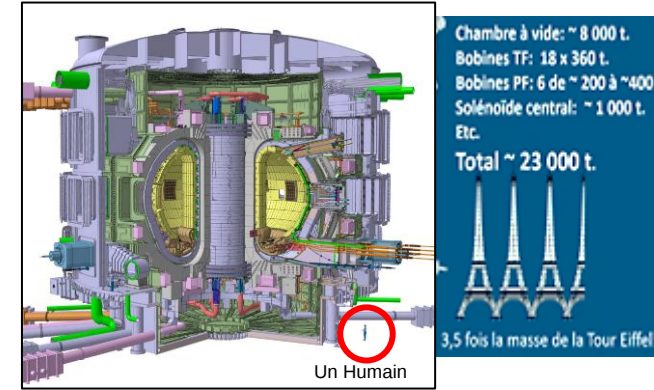
Projets en cours de Réacteur à Fusion
(Plasma deutérium-tritium auto-entretenu)

Chine, UE, Inde, Japon, Corée, Russie, USA.
Phase d'exploitation de 2028 à 2042. Phase industrielle ?

Lawrence Livermore National Laboratory :
Fusion par confinement inertiel par laser.
Déc. 2022

Les SMR pour "Small Modular Reactor"

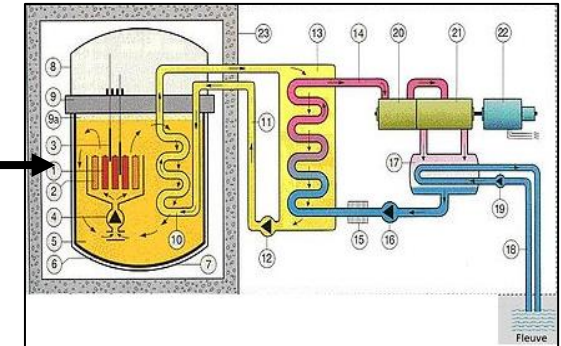
Port russe de Pevek (Sibérie) : Petit réacteur modulaire - SMR pour "Small Modular Reactor"
=
2 réacteurs de 35 mégawatts chacun, pouvant alimenter une ville de 100.000 habitants



Déployer au plus tôt les réacteurs nucléaires de 4ème génération (arrêt de Phénix en 1997, puis Astrid 2019 ...) ?

MSR : Réacteur à sels fondus
Mélange de **sels fondus** et de **matière** fissile qui développe une température de 600/700°C.

- 3 systèmes à neutrons rapides :**
- GFR (Gas-cooled Fast Reactor), réacteur à **neutrons rapides** refroidi au gaz *
 - SFR (Sodium-cooled Fast Reactor), réacteur à **neutrons rapides** refroidi au sodium
 - LFR (Lead-cooled fast Reactor), réacteur à **neutrons rapides** refroidi au plomb
- 3 autres types de réacteurs 4ème génération.**
- VHTR (Very High Temperature Reactor), réacteur à très haute température
 - SCWR (Supercritical Water-cooled Reactor), réacteur à eau supercritique
 - MSR (Molten Salt Reactor), réacteur à **sels fondus**



Réacteur à fission nucléaire utilisant des **neutrons rapides** (sans modérateur) et utilisant du sodium liquide comme caloporteur dans son circuit de refroidissement primaire

Superphénix était prévu pour produire plus de **plutonium** qu'il n'en consomme = **surgénération**

La Sté française Naarea, veut en construire des milliers d'ici à 2030 et refroidis par l'air ambiant.
Puissance moyenne < 50 MW.

MAÎTRISER LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DU DIGITAL/NUMÉRIQUE - PRODUCTION ET UTILISATION ?

Émissions de CO2 du Digital ?
(Monde, 2018 : 730 millions de tonnes de CO2 soit 4%)
= 2 fois les émissions de la France

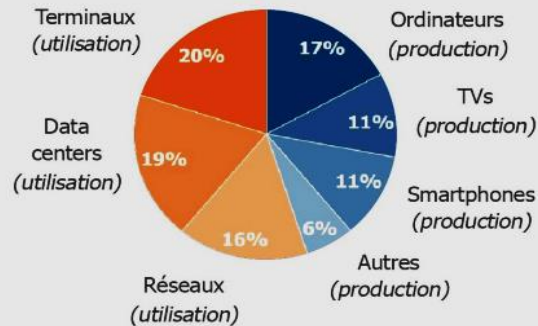
En IdF, un Data Center géant = 20 mégawatts de puissance,
= consommation d'une ville de 35000 habitants...
(66 centres "plus petits" en IdF)

95% des connections à Internet "passent" sous les océans

5 milliards d'utilisateurs d'Internet en 2022

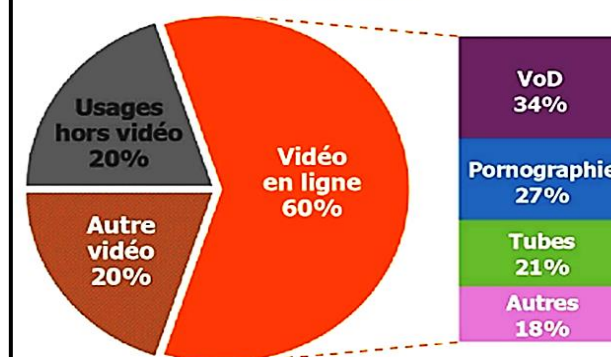
La Chine possède 70% des abonnés 5G dans le Monde...

Distribution de la Consommation énergétique pour la Production et l'Utilisation (2017)

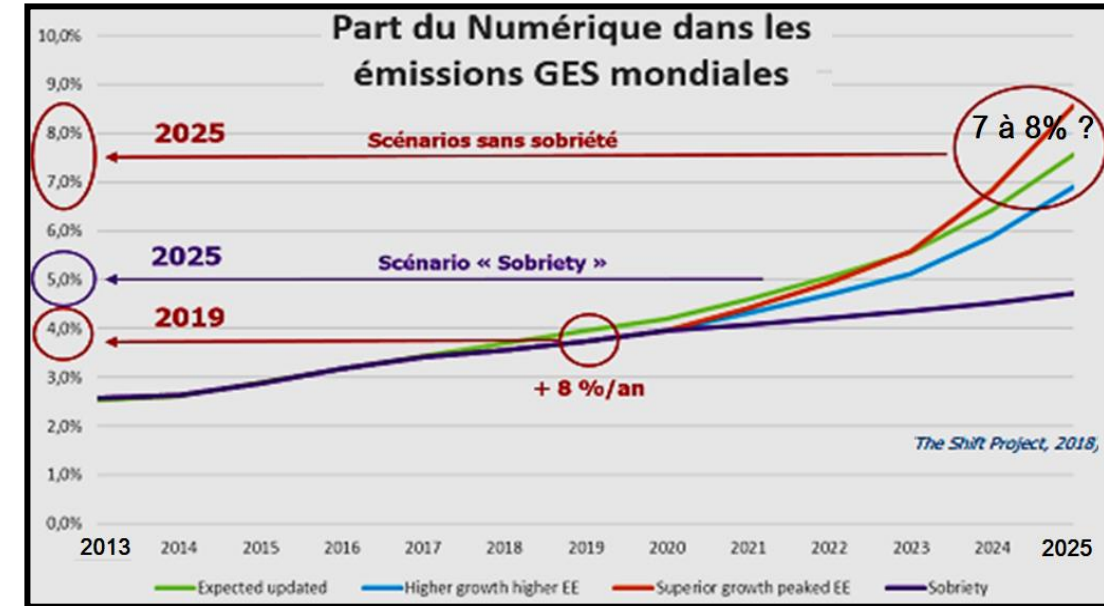


Usages dont Vidéos

Répartition des flux de données entre les différents usages du numérique et de la vidéo en ligne



The Shift Project Materials, 2019

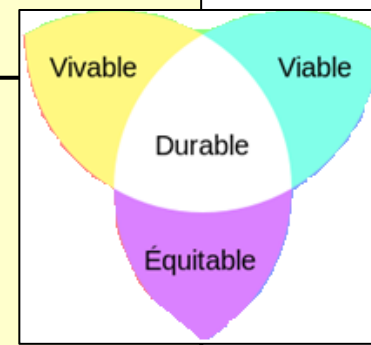


ÉLECTRONIQUE	COMMUNICATION
- Ordinateur fixe - avec écran plat : 1 280 kg CO₂ éq/appareil - Ordinateur portable - de 14,1 pouces : 202 kg CO₂ éq/appareil - Smartphone : 30 kg CO₂ éq/appareil	1 mail avec pièce jointe : 35 g CO₂ éq/unité 1 requête internet : 6,65 g CO₂ éq/unité 1 mail : 4 g CO₂ éq/unité 1 tweet : 0,02 g CO₂ éq/unité



**Nous sommes tous concernés
car
nos usages créent l'offre !**

En attendant le
Métavers !



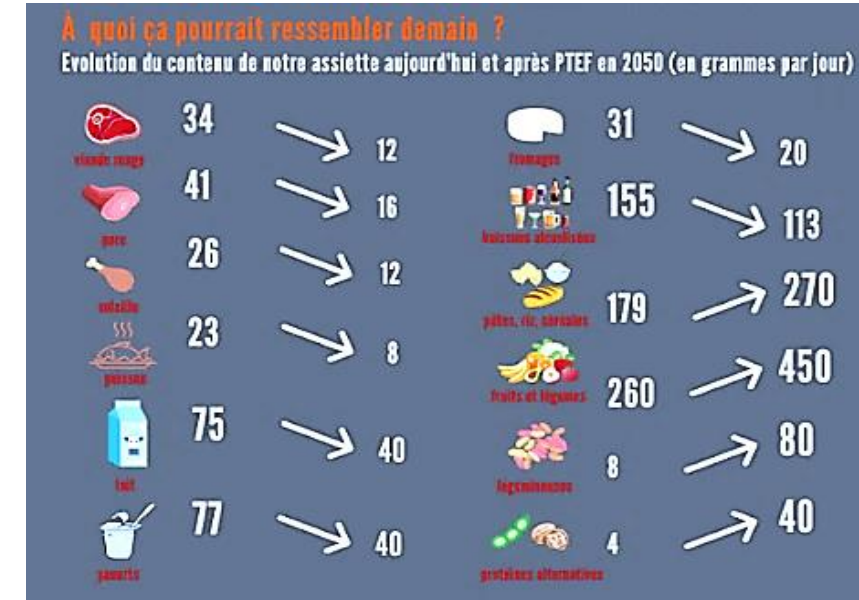
- **Plus d'urbanisation et un habitat "zéro énergie" :**
 - Plus d'immeubles
 - Des toits blancs ou végétaux,
 - Des jardins cultivés, etc.
 - Isolation des Bâtiments
 - Chauffeaux solaires,
 - Compteurs intelligents,
 - Récupération eaux de pluie
 - Pompes à chaleur,
 - Panneaux photovoltaïques,
 - Piles à combustible, ...
- **Le Recyclage :** Métaux, Plastiques, Déchets, Matériaux précieux, etc.
- **Réduction du gaspillage alimentaire** (production et consommation)
- **La Domotique** se répand : maisons et appartements avec équipements "connectés", programmés, consultables et télécommandables à distance, **Wi-Fi** (*Wireless Fidelity*), **Li-Fi** (*Light-Fidelity*), etc.
- **Des paysages transformés :**
 - éoliennes sur terre et en mer,
 - des puits de forages - gaz, géothermie -
 - des fours solaires, etc.
 - des fermes et des usines à méthanisation
 - des digues plus hautes le long des côtes (Montée des eaux)
- **Une chimie plus "organique"**
- **Des fermes piscicoles**
- **Des cultures agricoles nouvelles** (suite au réchauffement)
- **Des réacteurs nucléaires "nouveaux"** (Thorium, Marins, Fusion, etc.)
- ...

SHIFT PROJECT

PLAN DE TRANSFORMATION DE L'ÉCONOMIE FRANÇAISE

The Shift Project émet 9 propositions. Chacune propose un pourcentage estimé de la réduction des émissions de gaz à effet de serre que sa réalisation induirait :

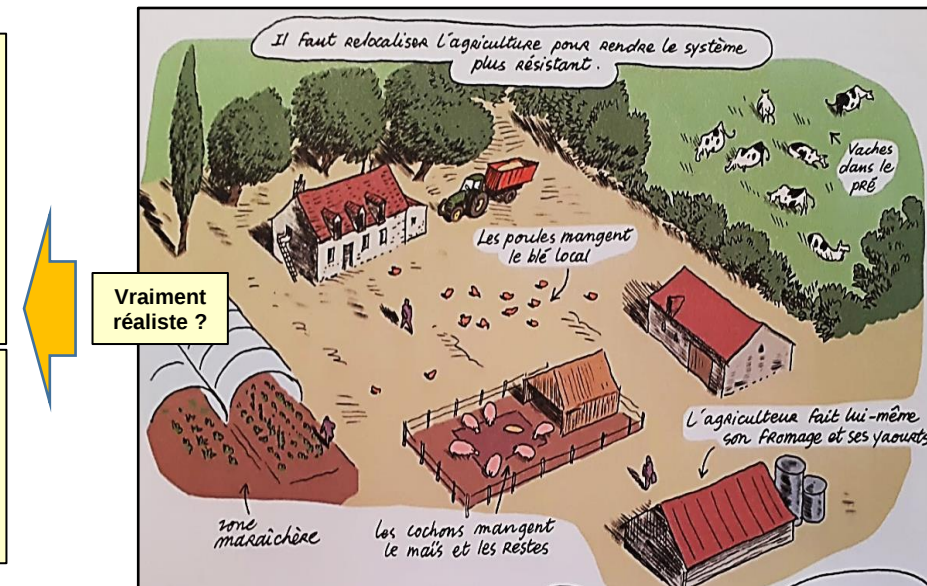
- **Fermer toutes les centrales au charbon (24%)**
- **Rénover les logements anciens (17%)**
- Généraliser la voiture à moins de 2L/100kms (14%)
- Relier les grandes métropoles par des trains rapides (9%)
- **Inventer l'industrie lourde post-carbone (7%)**
- Accomplir la révolution du transport en ville (6%)
- Réussir le passage à l'agriculture durable (5%)
- **Lancer le grand chantier de rénovation des bâtiments publics (4%)**
- Développer la séquestration de carbone par les forêts européennes (4%).



- **Agriculture** : 40% de la population mondiale vit de l'agriculture, soit 3,2 milliards de personnes (la moitié sont des actifs)
- Dont **Élevage** : 40% de la production agricole mondiale (45 millions d'éleveurs pays développés, 1,3 milliards dans les pays en développement)

Cheptel Mondial :

- 1,7 milliards de Bovins (Inde, Brésil, Chine, USA,...)
- 1,9 milliards de Moutons/Chèvres
- 980 millions de Porcs
- 19,6 milliards de Poulets



NEGAWATT

Scénario Négawatt (2021) :

- **Se passer du nucléaire** et des énergies fossiles et fonctionner seulement avec des énergies renouvelables...!
- Réduction de 66% de la conso d'énergie primaire (50% de l'énergie finale)
- 1/3 de notre conso avec les énergies renouvelables
- Rénover 780 000 logements / an (parc moyen à 40 kWh/m²/an) – en 2018 : 250 000 logements et parc à 200 kWh/m²/an...
- **L'essentiel de la baisse (60%) viendrait de la sobriété énergétique :**
 - ✓ Nb de logements construits divisés par 3 et surface baissée de 25% (plutôt du petit collectif).
 - ✓ Moitié moins de déplacements de plus de 1500 km
 - ✓ Plus de vols intérieurs et les internationaux diminués d'1/3
 - ✓ Usage voitures diminuerait de 50% dans les campagnes (avec taux de remplissage de 50%) et interdit dans les grandes villes.
 - ✓ Transport de marchandises diminuerait de 17%
 - ✓ Besoins en matériaux en forte baisse : - 26% Acier, - 35% Plastiques, - 39% Ciment, - 41% Verre
 - ✓ Autres baisses : Eau chaude - 29%, Cycles lave-linge - 22%, Lave vaisselle - 18%, Congélateurs - 50%, Usage fer à repasser - 33%,
 - ✓ Éclairage : baisse de 8 à 5 heures/jour dans le tertiaire, 33% de moins d'écrans par foyer et division par 3 du nombre d'ordinateurs

PAYSAGE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAIS EN 2050 SELON NÉGAWATT

Une consommation fortement réduite et couverte à 96% par des énergies renouvelables



En 2050, pétrole, gaz fossile et charbon ont quasiment disparu du paysage énergétique français*.



La consommation d'énergie primaire** est divisée par 3 d'ici 2050 et la production d'énergies renouvelables est multipliée par 3.



En 2045, le dernier réacteur nucléaire est fermé.