

Energies 2050

Le défi du sans carbone



Présentateur : Alain Capitaine

Quel est le problème ?



Depuis le début de l'ère industrielle, l'humanité utilise l'énergie fossile carbonée. Son utilisation rejette de grandes quantités de GES dans l'atmosphère. Cette énergie est partout, dans l'industrie, dans l'habitat, pour la mobilité, pour les engrais, l'élevage, l'agroalimentaire... L'énergie a été le moteur de notre développement, de notre émancipation, et de notre confort matériel.

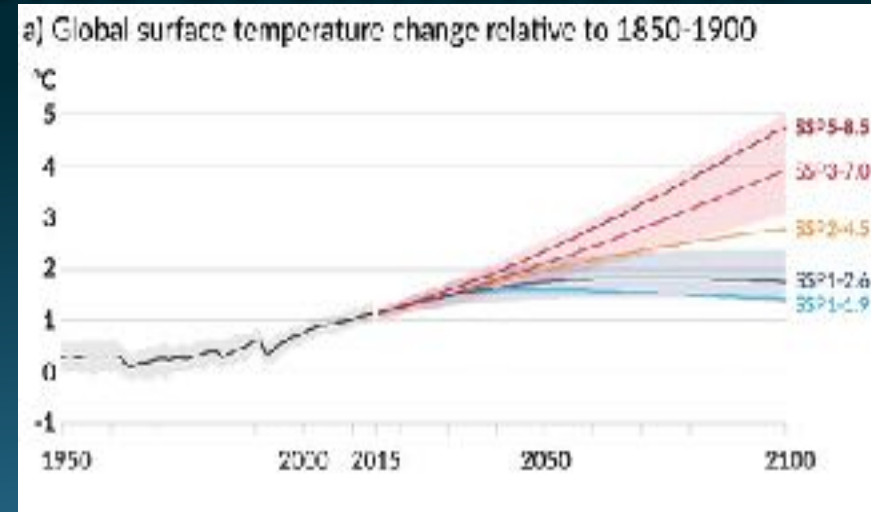
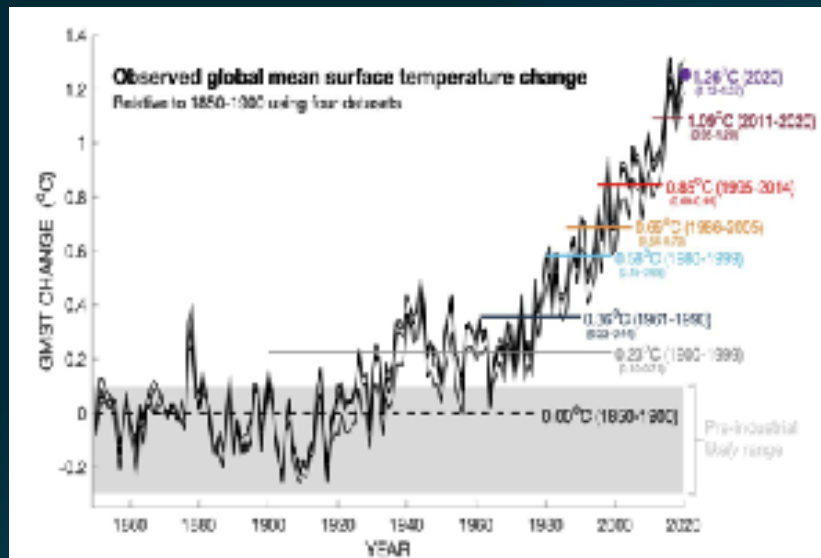
CO₂

CH₄

H₂O

N₂O
(protoxyde
d'azote)

Conséquences visibles et simulations



La concentration croissante de ces GES induit une augmentation de la température moyenne du globe et a des conséquences sur la biodiversité, le régime des pluies, le niveau des océans, la propagation de maladies parasitaires, la modification des courants marins, l'effondrement les réserves halieutiques.

Que peut on faire ?

Les climatologues sont formels. Il faut diviser par 3 nos rejets en CO₂ et modifier notre régime alimentaire afin qu'il soit moins carné.

Sans aucune ambigüité il faudrait en 30 ans, supprimer l'utilisation du charbon, réduire fortement l'emploi du pétrole et limiter le recours au gaz naturel (CH₄).

Quel choix avons-nous ? Devenir déclinologue ou utiliser en les optimisant les nouvelles technologies à notre disposition (le PV, l'Eolien, les Batteries, les électrolyseurs, le Nucléaire...) .

Je vous propose d'évaluer avec vous la seconde possibilité.

Le photovoltaïque

Charles Fritts (1850 – 1930) cet américain fit fonctionner en 1883 la première cellule en utilisant du silicium et une feuille d'or
En 1954 des ingénieurs de la compagnie Bell mettent au point la première cellule en silicium pour la conquête spatiale débutante.



Cellules polycristallines



Cellules monocristallines
(type Photowatt)

Agrivoltaïsme



Le photovoltaïque

Les axes de progrès depuis plus de 40 ans sont :

- 1 / Effet d'échelle, production dans des Gigafactory (50 GWh/an par usine)
- 2 / Effet du rendement, celui-ci est passé de 3% (Bell) à 24% à horizon 2024
- 3 / Augmentation de la durée de vie, de 20 ans vers 50 ans pour la nouvelle génération
- 4 / Elimination des matériaux faisant polémique (terres rares principalement)

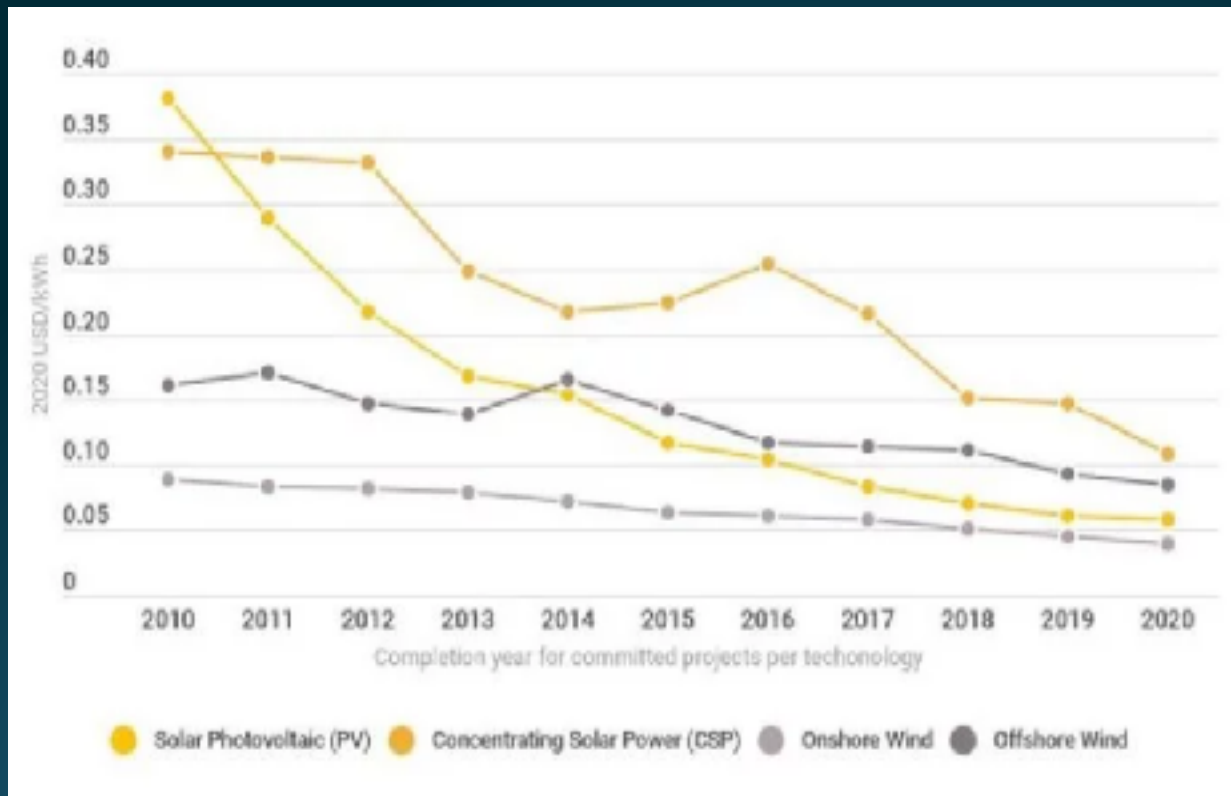
En prenant des informations auprès de PhotoWatt , l'industriel précise que pour les cellules monocristallines de sa fabrication, on retrouve , le silicium, le bore, le phosphore, l'aluminium ou l'acier pour les supports et le cuivre pour la connexion au réseau. L'argent qui est une ressource critique est en voie de remplacement

Le cout de revient de l'électricité PV ne fait que chuter depuis 40 ans (division des coûts par 100). L'indicateur opérationnel de comparaison est le LCOE

Le LCOE (Levelized Cost Of Electricity) se définit comme le rapport entre (l'investissement actualisée + coûts opérationnels du système) / (la production Électrique) correspondant au nombre de MWh électrique que produira le

Le photovoltaïque

Evolution du LCOE pour le PV et l'éolien d'après l'Agence Internationale pour les énergies renouvelables .



Division par 8 du LCOE pour le PV en 10 ans et par 2 du LCOE de l'éolienne offshore

L'Éolien

Les axes de progrès depuis plus de 20 ans sont :

- 1 / Effet d'échelle et de taille
- 2 / Effet facteur de charge, celui-ci passe de 20% pour l'éolien terrestre, jusqu'à 50% pour les éoliennes géantes en mer
- 3 / Augmentation de la durée de vie, de 20 ans à 30 ans pour la nouvelle génération
- 4 / Elimination progressive des matériaux onéreux (terres rares principalement)



Le coût de revient de l'électricité éolienne chute plus lentement que le PV, division par 2 du LCOE en 10 ans

Facteur de charge : C'est le rapport entre le nombre d'heures équivalentes pleine puissance en une année, et le nombre d'heures théoriques de fonctionnement en une année (8760 heures)

Le nucléaire

Sujet polémique pas forcément aidé par les dernières constructions en cours

Le nouveau nucléaire DOIT satisfaire à un nouveau cahier des charges depuis l'accident de Fukushima (2011). Cela a abouti à une complexification du design. Les exigences liées à la fabrication des composants et les spécifications pour les soudures sont devenues plus contraignantes.

De nouvelles pistes sont en cours d'investigation comme le produit SMR français NUWARD de 180 MW unitaire (voir ci contre)



Le LCOE objectif du nouveau nucléaire est d'environ de 90€/MWh. Mais le LCOE n'est pas tout

Hydraulique & turbines à gaz



La production mondiale en hydroélectricité est de 3400 TWh, mais le potentiel de développement mondial est considérable. Pour la France, les sites à équiper sont très restreints, aussi bien pour les barrages que pour les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage)

Les Turbines à Gaz (T àG) permettent de facilement boucler un MIX. Elles sont peu chères à l'achat, mais leur carburant, le gaz naturel, coûte de plus en plus cher et produit du CO₂.



Quelques digressions sur les unités et équivalences

L'unité de puissance est le W (Watt) correspondant à la dépense de 1 Joule/seconde

L'unité d'Énergie est le joule (J) . Si on dépense 1Joule/seconde durant une heure, on a dépensé 1Wh. On utilise tous les multiples (kWh, MWh, GWh, TWh)

Voici quelques équivalences du quotidien :

- _ 1Tep contient 11.6 MWh
- _ 1 Kg d'essence contient (44 millions de joules) soit 12,22 kWh
- _ 1 litre d'essence contient (12,22 kWh fois 0.76 (kg/litre) soit 9.29 kWh
- _ 1kg de charbon contient 8,2 kWh et rejette 2920 grammes de CO₂/kg (soit 356 grammes de CO₂/kWh)
- _ 1kg de méthane libère 15,42 kWh et rejette 3053 grammes de CO₂/kg (soit 198 grammes de CO₂/kWh)

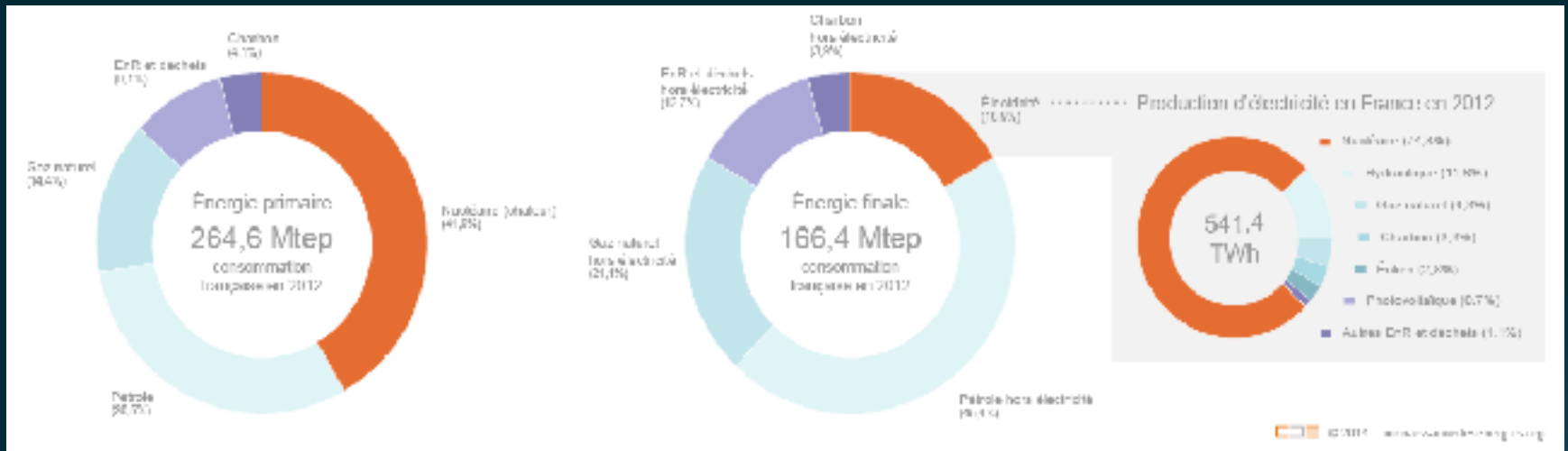
Energie primaire, Energie finale

L'énergie primaire est l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, les huiles de schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium.

L'énergie finale est la quantité d'énergie consommée et facturée à son point d'utilisation. L'énergie primaire représente la quantité totale d'énergie nécessaire pour fournir la quantité d'énergie finale consommée par l'utilisateur, c'est-à-dire en rajoutant à cette énergie finale l'énergie nécessaire à sa production et à son transport, en intégrant les notions de rendement de production et les pertes.

Quand on parle de bilan énergétique et de consommation ou d'économie d'énergie, il faut savoir de quelle énergie on parle

Tableau des Energies pour la France



Mais les choses évoluent, 2 exemples emblématiques, la voiture et le chauffage

Une voiture thermique consommant 5 litres/100 d'essence, correspond à 50 kWh.

Une voiture électrique pour le même service consommera 15 kWh d'électricité.

Pour le chauffage, une pompe à chaleur qui consomme 1kWh d'électricité peut restituer 3 kWh d'énergie thermique.

Décarbonation de notre société

Pour décarboner notre société il faut faire des transferts d'usages. Il faut remplacer partout où cela est possible les procédés consommant du charbon, du pétrole, du gaz par des procédés consommant de l'électricité peu carbonée. Pour la mobilité, l'habitat, l'industrie, la chimie, l'agriculture (engrais), les aciéries...

Du fait du transfert d'usage, les prévisions sérieuses (RTE, Académie des technologies) prévoient pour 2050, (en y incluant une production électrique pour l'électrolyse de l'hydrogène), une consommation nationale de l'ordre de **800 TWh d'électricité**.
je retiens ce chiffre.

Aujourd'hui la consommation d'électricité en France est de : **473 TWh**

Néanmoins, il existera toujours des besoins thermiques (les serres, le chauffage, le séchage,...). Pour ces besoins, GRDF nous donne un chiffre de l'ordre de **500 TWh sous forme thermique**. On y retrouve la biomasse (déchets, gaz, bois,...), mais aussi le gaz du réseau (CH₄ + H₂).

Le transfert d'usage et les usages thermiques, visent la neutralité carbone en 2050.



En transformant ces valeurs en Tep, la France de 2050 consommera 111.5 Mtep, soit 2.38 fois moins qu'en 2012. Attention les chiffres sont parfois trompeurs.

Voilà les éléments sont en place, mais il en manque un ! Le stockage

De quels moyens de stockage disposons nous ?

Les STEP (5GW installés et 7 TWh de stockage restitué sur l'année), pas grand-chose à dire, leur développement est limité du fait de la raréfaction des sites .

Les Batteries : le sujet est vaste, structurant, en pleine évolution, nous allons nous y attarder.

L'hydrogène, il déchaine les médias et passionne les politiques, à tort ou à raison ?

La Batterie

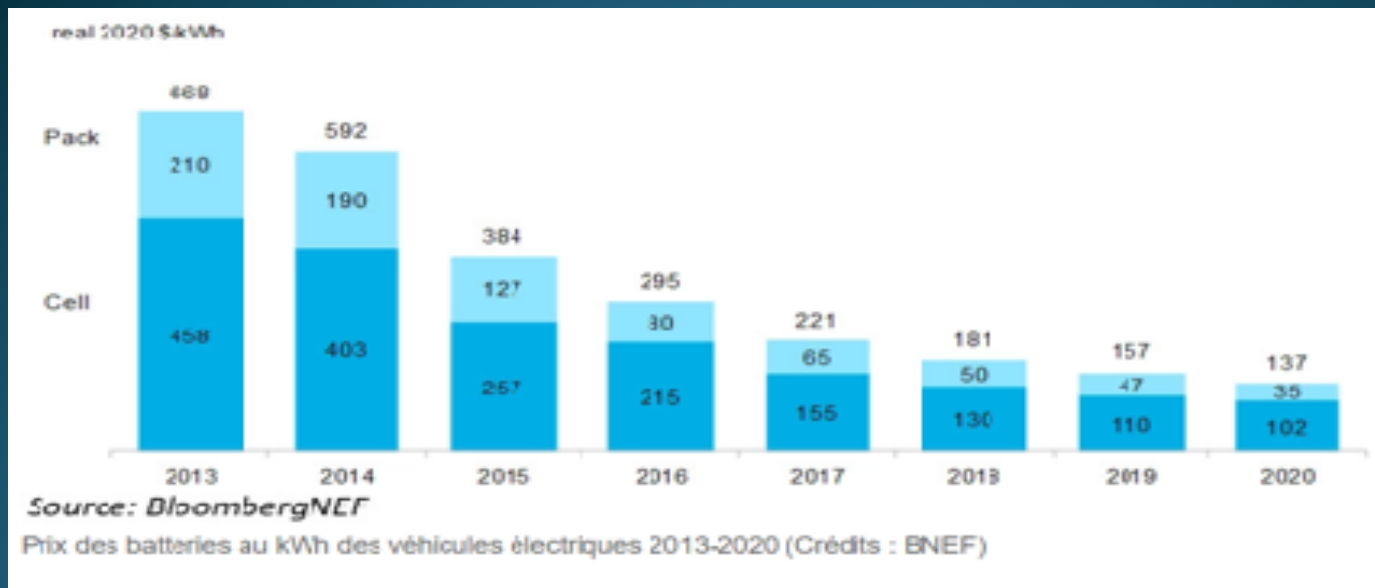
Un peu d'histoire, C'est Gaston Planté (1834 – 1899) né à Orthez, qui améliore significativement la batterie au plomb. On retrouvera celle-ci en 1899 sur "La jamais contente " qui est le premier véhicule automobile à avoir franchi les 100 km/h.



La Batterie

En 1899, les performances des batteries au plomb, n'incitent pas à continuer dans cette voie. Néanmoins les besoins dans l'aviation suscitent des recherches et de nouvelles voies apparaissent.

Aujourd'hui ,après des décennies de recherches, pas un mois sans qu'une rupture technologique soit annoncée. La production de masse provoque un effondrement des prix .



La Batterie

Les axes de progrès en œuvre depuis plus de 40 ans sont :

- 1** / Effet d'échelle, production dans des Gigafactory
- 2** / Performances avec l'accroissement des kWh stockés/kg dans les batteries
- 3** / Augmentation du nombre charge/décharge (de 800 à plus de 4000)
- 4** / Elimination progressive des matériaux onéreux (terres rares, cobalt, nickel...) telle la nouvelle batterie LFP (Lithium, Fer, Phosphore) mise en œuvre sur la Tesla 3 ou les batteries, Lithium, Sodium, pour un stockage stationnaire.
- 5** / Arrivée prochaine des batteries tout solide (batteries SAFT...) , l'électrolyte n'est plus liquide mais solide, ce qui améliore la sécurité des batteries et leurs performances.

Les batteries serviront la mobilité électrique mais aussi le stockage stationnaire .
Les batteries deviennent le "game changer "des MIX de demain.

L'Hydrogène

En appliquant la définition de l'Energie, l'hydrogène est une énergie finale. Il a subi un processus de transformation, soit à partir du méthane, de l'eau ou de la biomasse. L'hydrogène est un vecteur énergétique.

Aujourd'hui l'hydrogène est un composé indispensable pour le raffinage ou pour la chimie. On en consomme annuellement 1 million de tonnes en France et plus de 60 millions de tonnes par an dans le monde.

Quand l'hydrogène est produit par reformage, on consomme une matière première le méthane, et on produit inéluctablement 10 tonnes de CO₂ par tonne d'H₂ produit. Un moyen de production plus vertueux pourrait être l'électrolyse de l'eau.

Nous ne traiterons ici que sa production par électrolyse.

Un autre point important en cas de production massive de l'hydrogène, on dispose ainsi d'un moyen de stockage saisonnier de l'énergie.

L'Hydrogène quelques chiffres

1 kg d'H₂ contient 120 MJ/kg , pour le produire il a fallu consommer environ 171 MJ d'électricité correspondant à 47 kWh électrique. En effet, l'électrolyseur a un rendement d'environ 70% et celui-ci s'améliore progressivement.

L'hydrogène produit peut être injecté directement dans les réseaux du gaz, à raison de 20% en masse, mais cela ne se fera pas avant 2035 le temps d'adapter les équipements. L'hydrogène peut aussi être utilisé dans les voitures et/ou les camions, mais aussi peut être utilisé en l'état pour la chimie, la production d'engrais, la métallurgie,...

Pour la mobilité on peut utiliser la Pile à Combustible, c'est un peu l'inverse de l'électrolyse. Dans la PàC , on utilise l'H₂ qu'on transforme en courant électrique avec un rendement d'à peine 50% . La succession des phases, d'électrolyse, de compression, de distribution, puis l'utilisation dans une pile à combustible, font que le rendement global n'est que de l'ordre de 25% à condition de disposer d'électricité au départ.

Les MIX

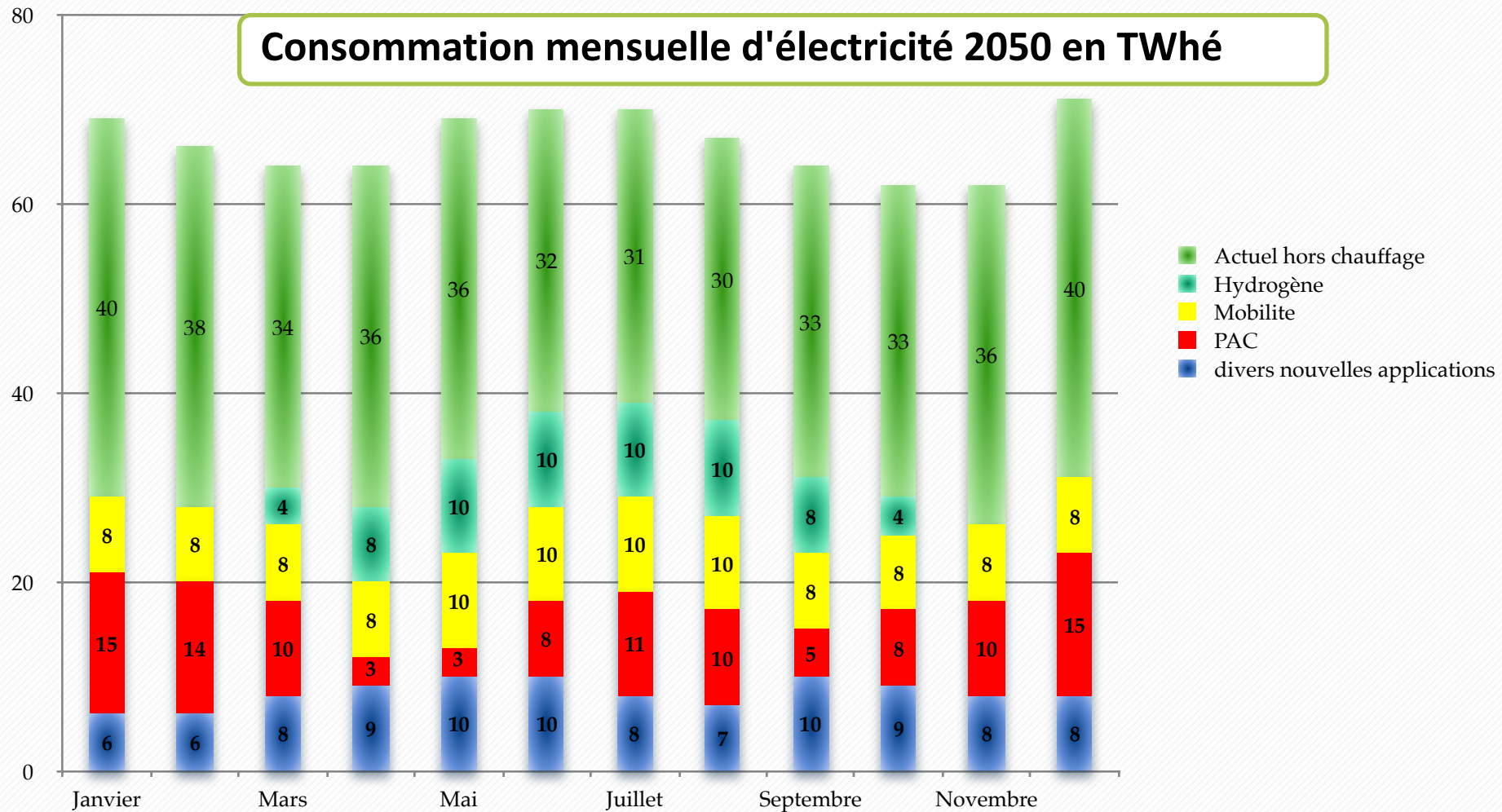
Le choix d'un MIX est à la fois une optimisation technique , économique, mais c'est aussi un choix politique qui doit être assumé.

Dans les slides qui précèdent, nous avons présenté les principaux moyens de production et de stockage. Maintenant il faut proposer plusieurs MIX en en détaillant qu'un seul.

Cahier des charges pour chaque MIX :

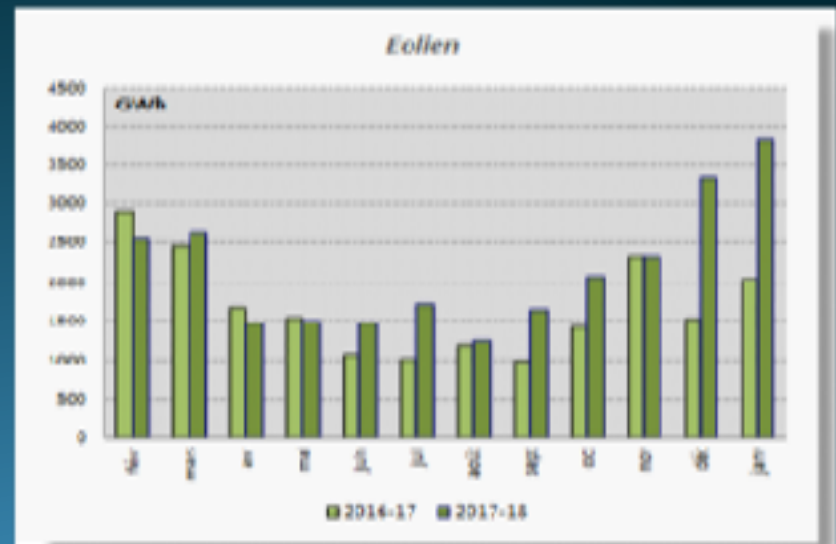
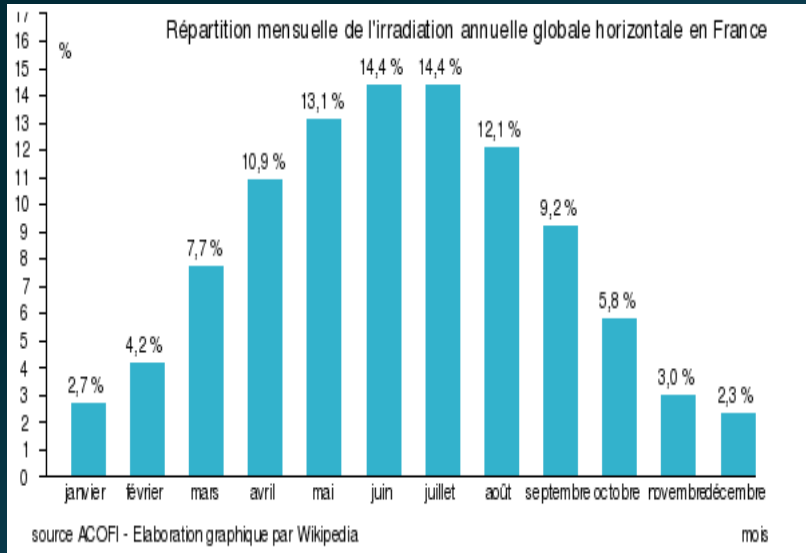
Chaque MIX doit produire annuellement 800 TWh d'électricité
Chaque MIX doit satisfaire à la demande quel que soit le jour de l'année
Le MIX retenu doit tendre vers la neutralité carbone
Le MIX retenu doit être acceptable et le moins cher possible

Les MIX (La consommation)



Les MIX (Comportement des EnR)

Courbe de production annuelle du solaire et de l'éolien



Il y a une complémentarité de la production entre PV et éolien sur l'année

Le MIX N30

3 MIX sont étudiés, N30 (30 GW de nucléaire), N60 (60 GW de nucléaire), N0 (0GW de nucléaire). Dans un premier temps concentrons nous sur le MIX N30.

**Tableau des coûts (investissement et exploitation)
en France d'ici 2050 pour constituer le mix N 30**

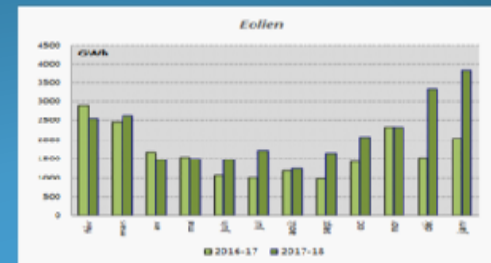
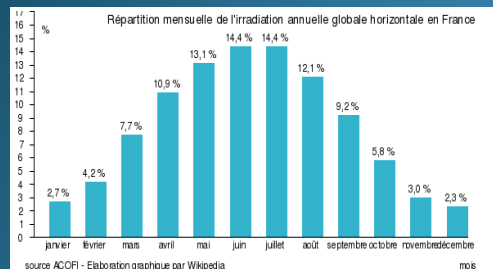
Type de production	Puissance installée GW	durée vie du produit (an)	Coût par kW installé (Euro) horizon 2035	Coût investissement initial (Md€)	Nb heures fonctionnement par an	Energie produite TWhé par an	cout LCOE €/Mwhé parc mix	Coût total de production en Md€ / an
Photovoltaïque	260	50	750	195	1250	325	30	9,75
Eolien surtout offshore	50	20	1750	88	2800	140	70	9,80
Hydraulique	25	100	<i>renovation et suréquipement de l'existant</i>	30	#	70	20	1,40
Turbine à gaz à cycle combiné mélange CH4 + H2	25	50	750	18,75	2000	50	100	5,00
Centrale Nucléaire	30	60	5000	150	7000	210	90	18,90

Coût de production du mix et LCOE équivalent	Investissement initial	481,25		795	56,4	44,85
LCOE et coût renouvellement parc mix à l'équilibre	Investissement annuel pour remplacement	11,45			14,4	11,45
LCOE et coût renouvellement batteries à l'équilibre	Investissement annuel pour remplacement	6,00			8,2	6,00
Coût revient du parc avec investissement remplacement équipements	Investissement annuel pour remplacement équipements	17,45	Coût revient du parc Md€/an	62,30	79,0	62,30

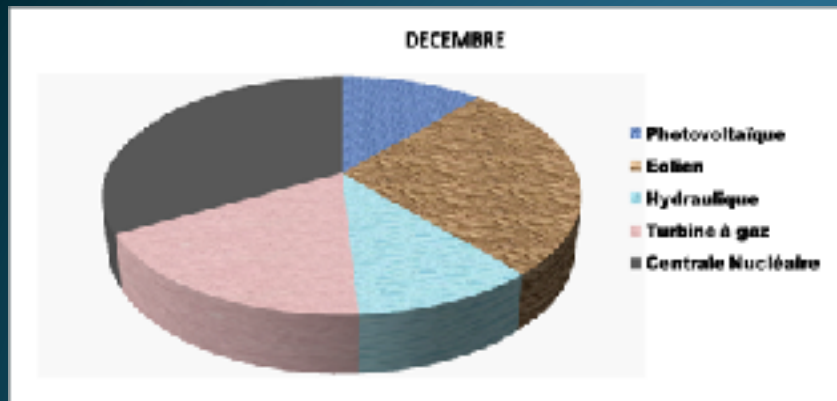
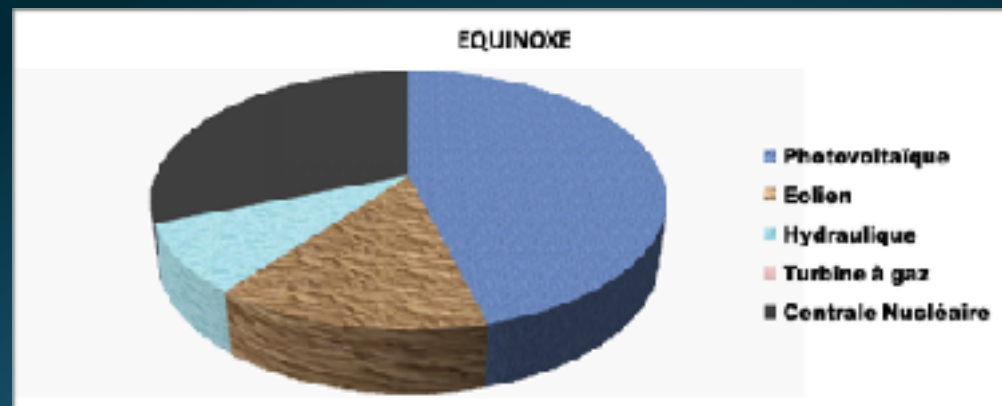
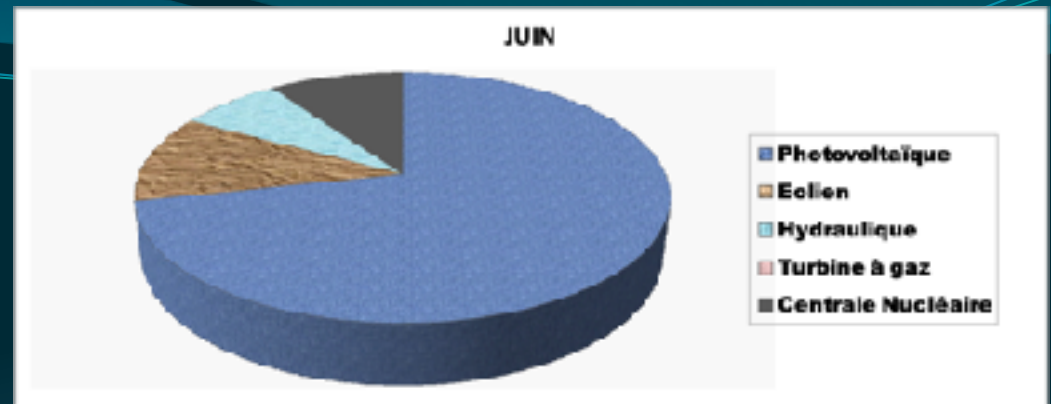
Les MIX

Production journalière moyenne du MIX N30

	Production Annuelle	Production Journalière juillet (TWh)	Production Journalière equinoxe (TWh)	Production Journalière décembre (TWh)
Photovoltaïque	325	1,56	1	0,25
Eolien	140	0,25	0,32	0,59
Hydraulique	70	0,16	0,19	0,23
TAC	50	0	0	0,39
Centrale Nucléaire	210	0,21	0,67	0,72
Production journalière moyenne (TWh)		2,18	2,18	2,18



Les MIX



Camembert des diverses productions dans différents moments de l'année

Le Stockage

Pour tout MIX incluant une fraction importante d'EnR , celui-ci DOIT disposer d'une fonction Stockage . Ce stockage sera d'autant plus conséquent que la partie EnR du MIX sera importante.

Pour le moment l'approche est assez empirique. Si on regarde les camemberts du slide de la page 26, on voit que pour **le MIX N30**, il va falloir disposer d'au moins **750 GWh** de stockage pour ne pas perdre l'énergie électrique produite par le PV chaque journée d'été. En considérant des marges, il faut prévoir une réserve supplémentaire que j'estime à **500 GWh**. Les simulations à partir du REX de la météorologie et du REX de RTE permettront d'affiner ces chiffres.

Une question souvent évoquée, mais plus rarement renseignée est : Quel est le coût de revient **du MWh stocké puis déstocké ?** Tous les MWh produits par les EnR ne seront pas stockés, mais une partie passera par les batteries ou les STEP. Le tableau suivant doit aider à répondre à la question.

Le Stockage

Tableau des coûts (investissement et exploitation) en France d'ici 2050 pour constituer le mix N 30

Cout de production du mix et LCDE équilibré	Investissement initial	481,25	795	56,4	44,85	
LCDE et cout renouvellement parc mix à l'équilibre	Investissement annuel pour remplacement	11,45		14,4	11,45	
LCDE et cout renouvellement batteries à l'équilibre	Investissement annuel pour remplacement	6,00		8,2	6,00	
cout revient du parc avec Investissement remplacement équipements	Investissement annuel pour remplacement équipements	17,45	Coût relatif au parc ANF/ha	62,30	79,0	62,30

Back up batteries

Le Stockage

Back up batteries

	Capacité stockage GWh	durée vie en produit (ans)	Coût 1 kWh de la batterie (Euro)	Coût investissement M€	Energie stockée restituée TWh/par an	cout LCDE €/MWh	cout LCDE €/MWh / % part
batteries stationnaires neuves Investissement initial	500	20	120	60	80	41,75	4,18
batteries stationnaires 2 ^{ème} vie Investissement initial	750	15	60	45	120	27,00	4,05
batteries stationnaires neuves Investissement annuel	25	20	120	3,00			
batteries stationnaires 2 ^{ème} vie Investissement annuel	50	15	60	3,00			

Pour ce MIX N30, 1/4 des MWh consommés passent dans le stockage

Le Coût MIX N60

**Tableau des coûts (investissement et exploitation)
en France d'ici 2050 pour constituer le mix N 60**

Type de production	Puissance installée GW	durée vie du produit (an)	Coût par kW installé (Euro) horizon 2035	Coût investissement initial (Md€)	Nb heures fonctionnement par an	Energie produite TWhé par an	coût LCOE €/Mwhé parc mix	Coût total de production en Md€ / an
Photovoltaïque	180	50	750	135	1250	225	30	6,75
Eolien surtout offshore	30	20	1750	53	2800	84	70	5,88
Hydraulique	25	100	<i>rénovation et suréquipement de l'existant</i>	30	#	70	20	1,40
Turbine à gaz à cycle combiné mélange CH4 + H2	10	50	750	7,5	2000	20	100	2,00
Centrale Nucléaire	60	60	5000	300	6600	396	95	37,62

<i>Coût de production du mix et LCOE équivalent</i>	<i>Investissement initial</i>	525		795	67,5	53,65
<i>LCOE et coût renouvellement parc mix à l'équilibre</i>	<i>Investissement annuel pour remplacement</i>	10,78			13,6	10,78
<i>LCOE et coût renouvellement batteries à l'équilibre</i>	<i>Investissement annuel pour remplacement</i>	3,00			4,0	3,00
<i>coût revient du parc avec investissement remplacement équipements</i>	<i>Investissement annuel pour remplacement équipements</i>	13,78	<i>Coût revient du parc Md€/an</i>	67,43	85,0	67,43

Le Coût MIX N 0

**Tableau des coûts (investissement et exploitation)
en France d'ici 2050 pour constituer le mix N 0**

Type de production	Puissance installée GW	durée vie du produit (an)	Coût par kW installé (Euro) horizon 2035	Coût investissement initial (Md€)	Nb heures fonctionnement par an	Energie produite TWhé par an	coût LCOE €/Mwhé parc mix	Coût total de production en Md€ / an
Photovoltaïque	340	50	750	255	1250	425	30	12,75
Eolien surtout offshore	60	20	1750	105	2800	168	70	11,76
Hydraulique	25	100	<i>renovation et suréquipement de l'existant</i>	30	#	70	20	1,40
Turbine à gaz à cycle combiné mélange CH4 + H2	50	50	750	37,5	2700	135	100	13,50
Centrale Nucléaire	0	60	5000	0	7000	0	90	0

Coût de production du mix et LCOE équivalent	Investissement initial	427,5		798	49,4	39,41
LCOE et coût renouvellement parc mix à l'équilibre	Investissement annuel pour remplacement	11,40			14,3	11,40
LCOE et coût renouvellement batteries à l'équilibre	Investissement annuel pour remplacement	12,00			16,6	12,00
coût revient du parc avec investissement remplacement équipements	Investissement annuel pour remplacement équipements	23,40	Coût revient du parc Md€/an	62,81	80,3	62,81

Conclusion

Le dérèglement du climat s'accélère, cela nous conduit vers des "terra incognita" potentiellement très dangereuses pour l'Humanité.

Pour infléchir ce mouvement et pour arriver à la neutralité carbone, on va devoir mettre en œuvre des technologies déjà largement disponibles. Cela va correspondre à un investissement annuel d'environ 1% du PIB pour les pays riches.

Les pays en développement devront consacrer, en tout cas au début de leur transition, 3% de leur PIB pour parvenir en 30 ans à leur neutralité carbone. Il faudra les y aider.

Globalement cela va représenter un effort de l'ordre de 2% du PIB mondial (1600 Md\$) par an. L'objectif est de décarboner largement l'énergie consommée sur Terre.

Tout renoncement se paiera beaucoup plus cher à terme.

**Pour prolonger et
pour approfondir les
éléments présentés
ici, vous pouvez vous
référer à l'ouvrage
ci-contre**

