

15 octobre 2019

Quelle énergie pour 2050 ?

Une énergie sans carbone est-elle possible ?

G. Cognet

Expert en énergie nucléaire et stratégie énergétique

Expert de justice près la

Cour d'Appel de Nîmes et la Cour d'Appel administrative de Marseille

Ancien Conseiller Nucléaire près des Ambassades de France en
Europe de l'Est et en Turquie

Sommaire

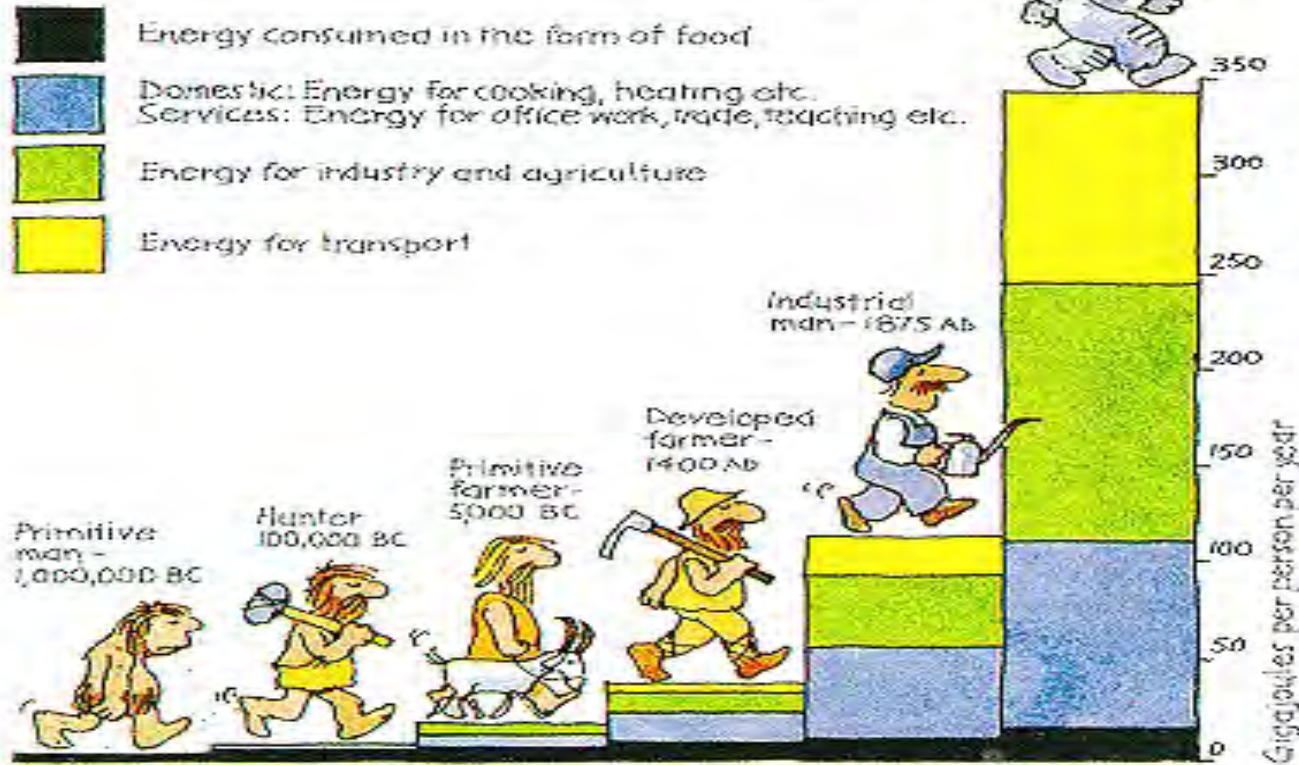
- **Problématique de l'énergie**
- **Ressources primaires présentes et futures**
- **La demande**
- **Prise de conscience politique**
- **L'électricité**
- **L'hydrogène**
- **Conclusions**

Problématique de l'énergie:

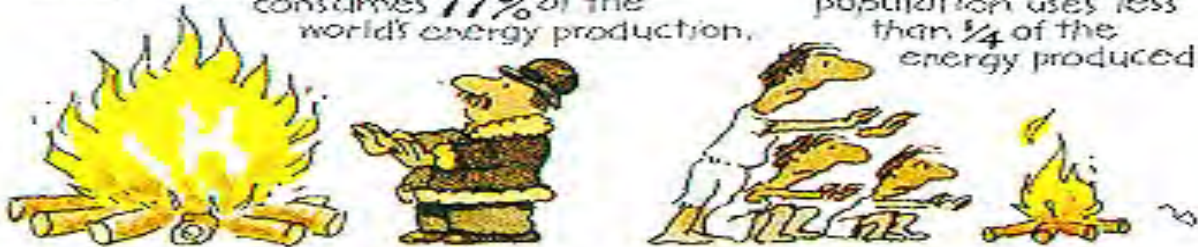
1) une consommation croissante

Individual energy consumption

Adapted from Unesco - Courier

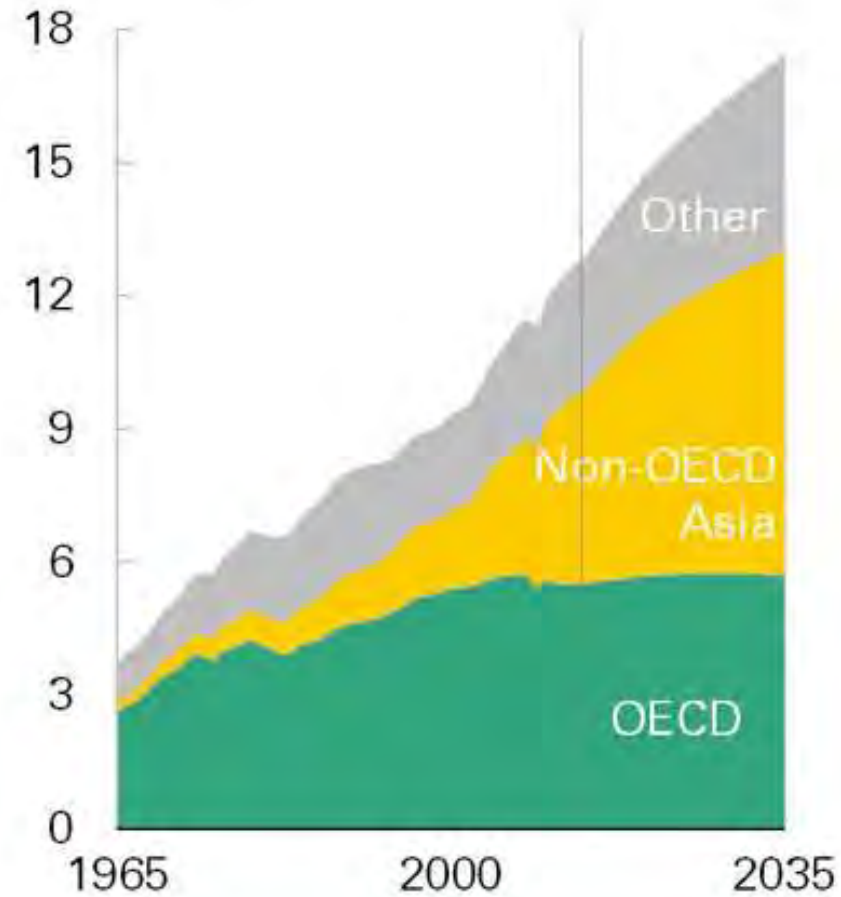


Today **28%** of the world's population consumes **77%** of the world's energy production.
 Or **3/4** of the world's population uses less than **1/4** of the energy produced



Consommation d'énergie primaire

Billion toe

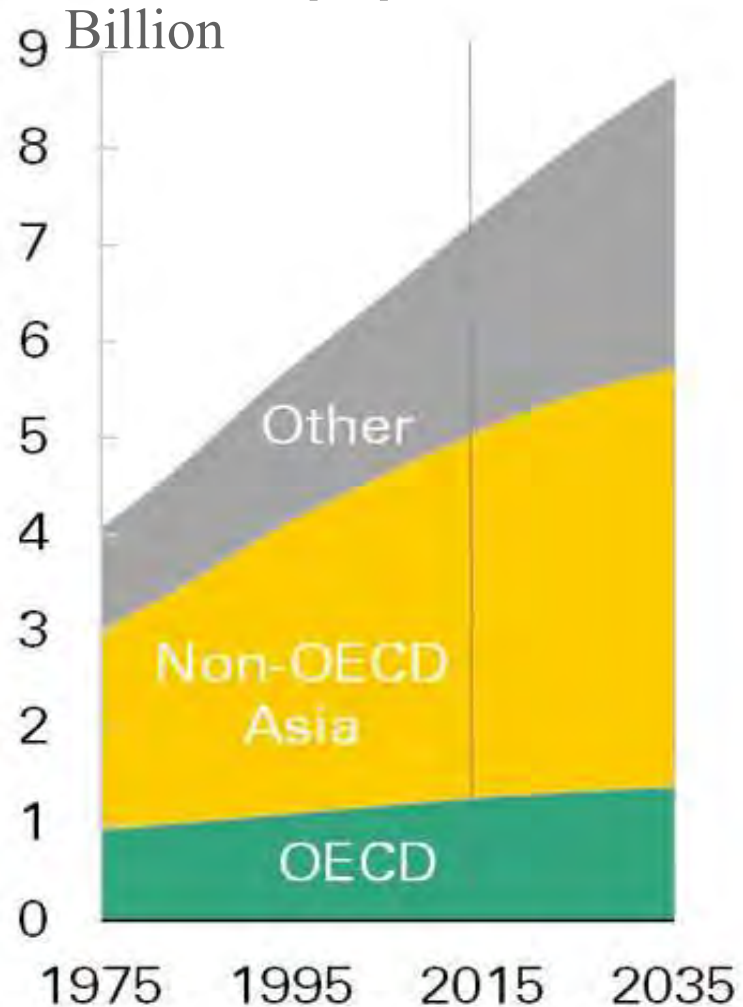


Source: BP Energy Outlook 2035

Problématique de l'énergie:

2) un accroissement de la population mondiale

World population



Source: BP Energy Outlook 2035



En 2000: 6 milliards de personnes, 7 milliards en 2012
Environ 9 milliards en 2050

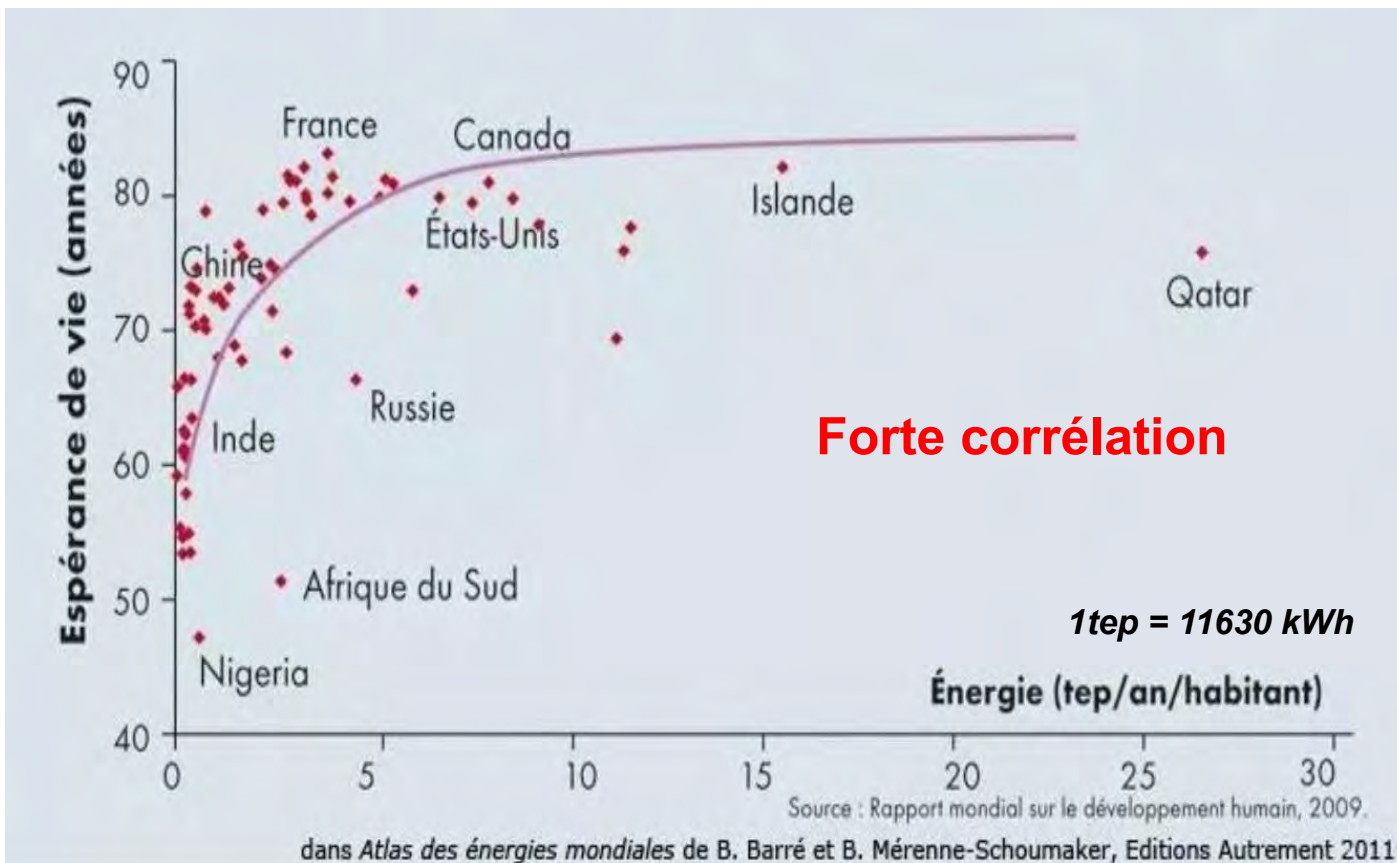


une augmentation de ~ 50% en 50 ans

Problématique de l'énergie:

3) l'énergie est aussi un facteur de développement

Espérance de vie en fonction de la consommation d'énergie (Monde)



Aujourd'hui, 28 % de la population mondiale consomme 77% de la production mondiale d'énergie et 1,6 Mds de personnes n'ont pas accès à l'électricité

Un minimum de 2,5 tep/an pour chaque individu représenterait + 40% de la demande mondiale d'énergie en 2035

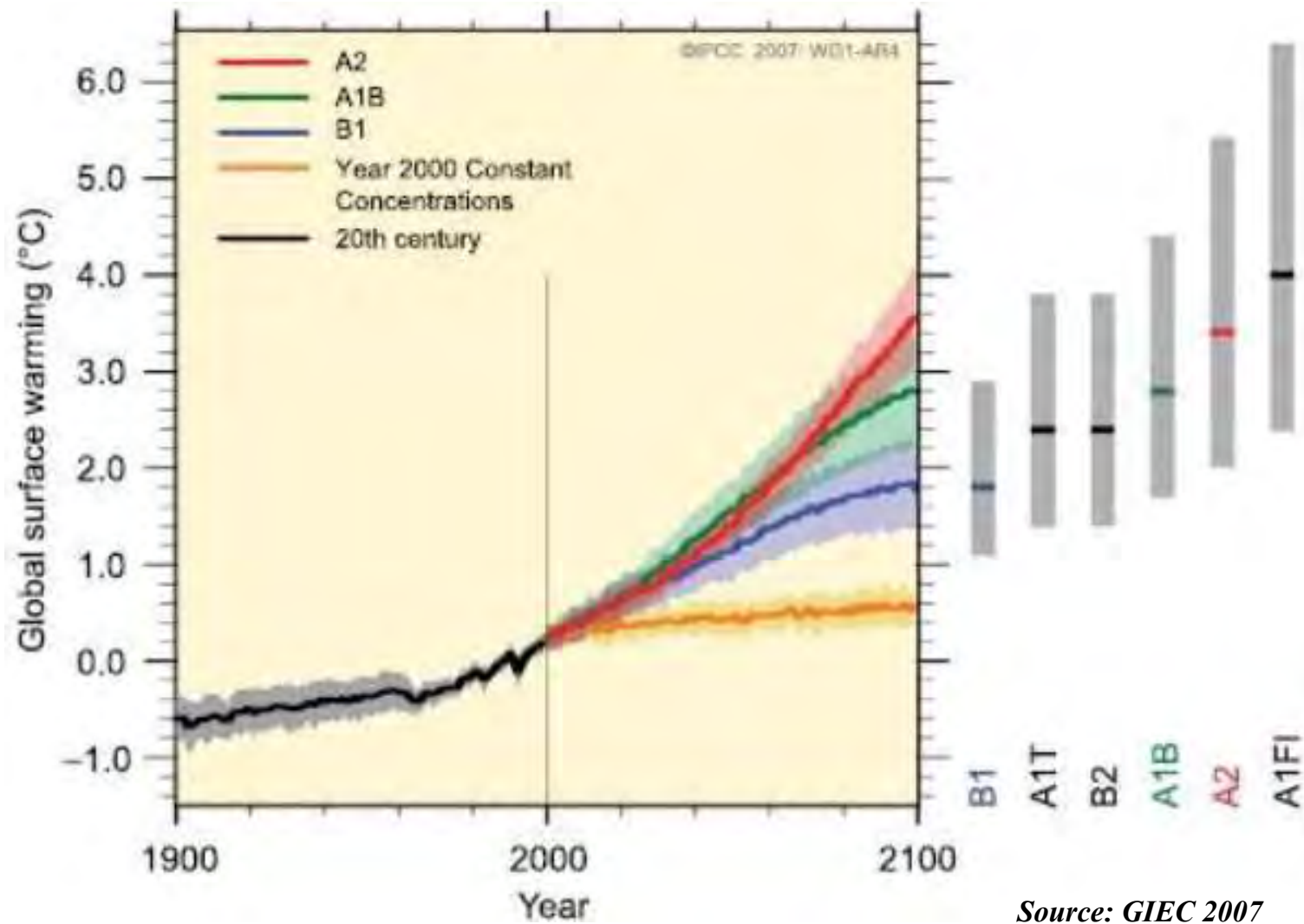
L'accès à l'énergie est un droit



La consommation d'énergie va augmenter

Problématique de l'énergie:

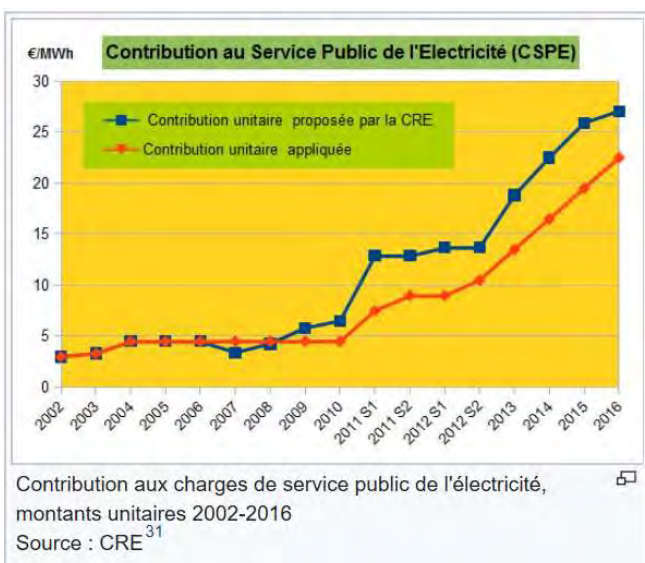
4) Le changement climatique: entre +2 et +4C en 2100



Problématique de l'énergie:

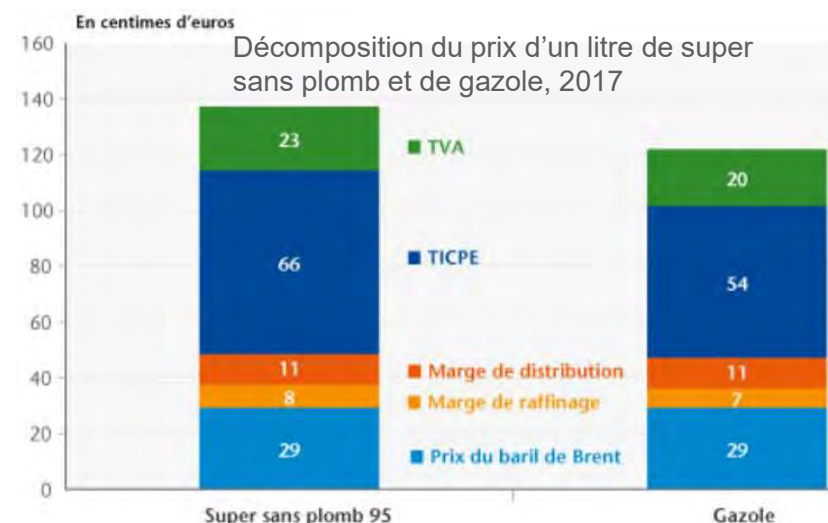
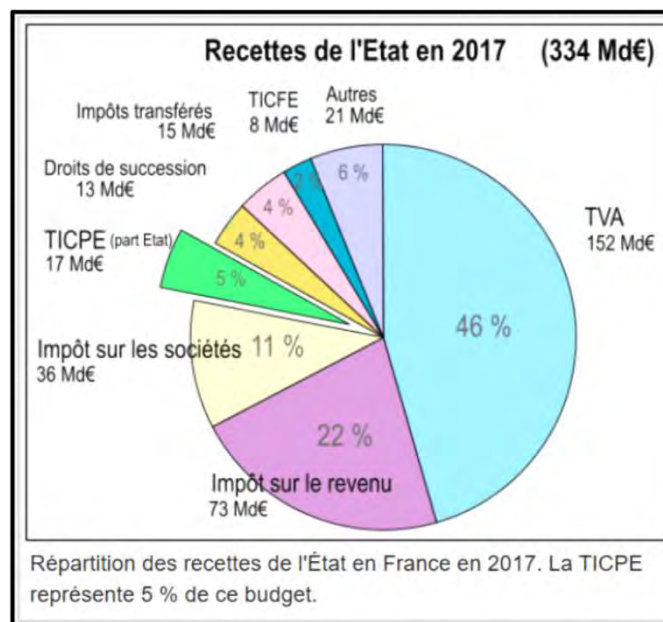
5) le coût pour la société et l'utilisateur final

Dans la plupart des pays, et en particulier en Europe, les marchés de l'énergie sont plus ou moins « contrôlés » par les états.



CSPE

TICFE



Sources : UFIP, DGEC, calculs de l'auteur.

TICPE

TICGN

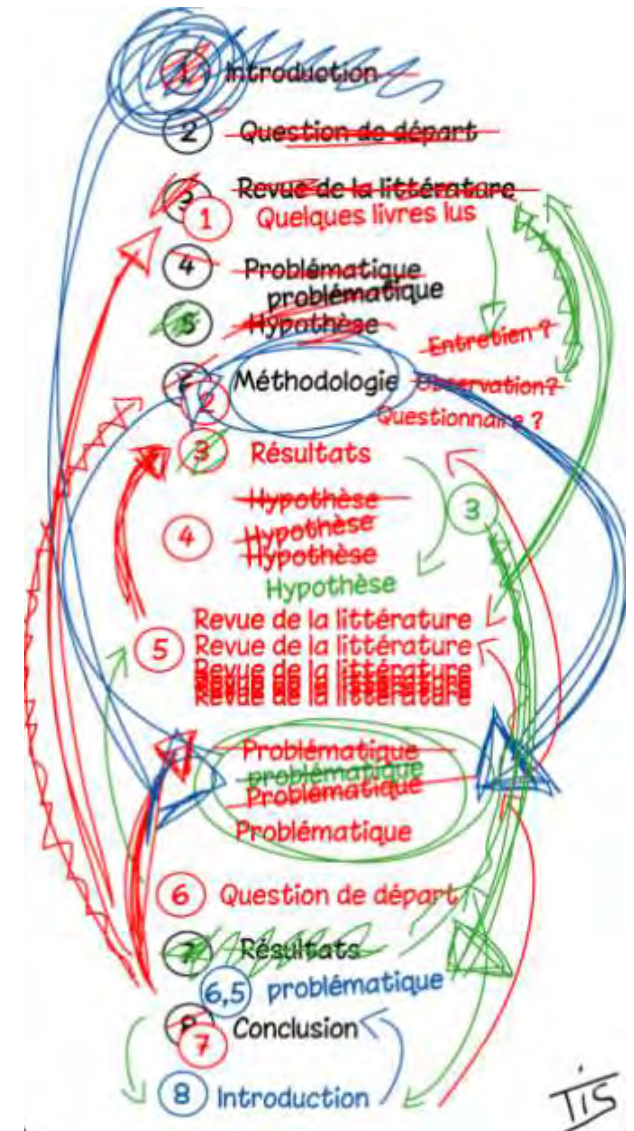
En France, la Commission de régulation de l'énergie (CRE) veille au bon fonctionnement des marchés de l'électricité et du gaz, au bénéfice du consommateur final et en cohérence avec les objectifs de la politique énergétique

Problématique de l'énergie

- 1) une consommation croissante
- 2) un accroissement de la population mondiale
- 3) l'énergie, facteur de développement
- 4) Le changement climatique
- 5) le coût pour la société et l'utilisateur final

3 contraintes inéluctables

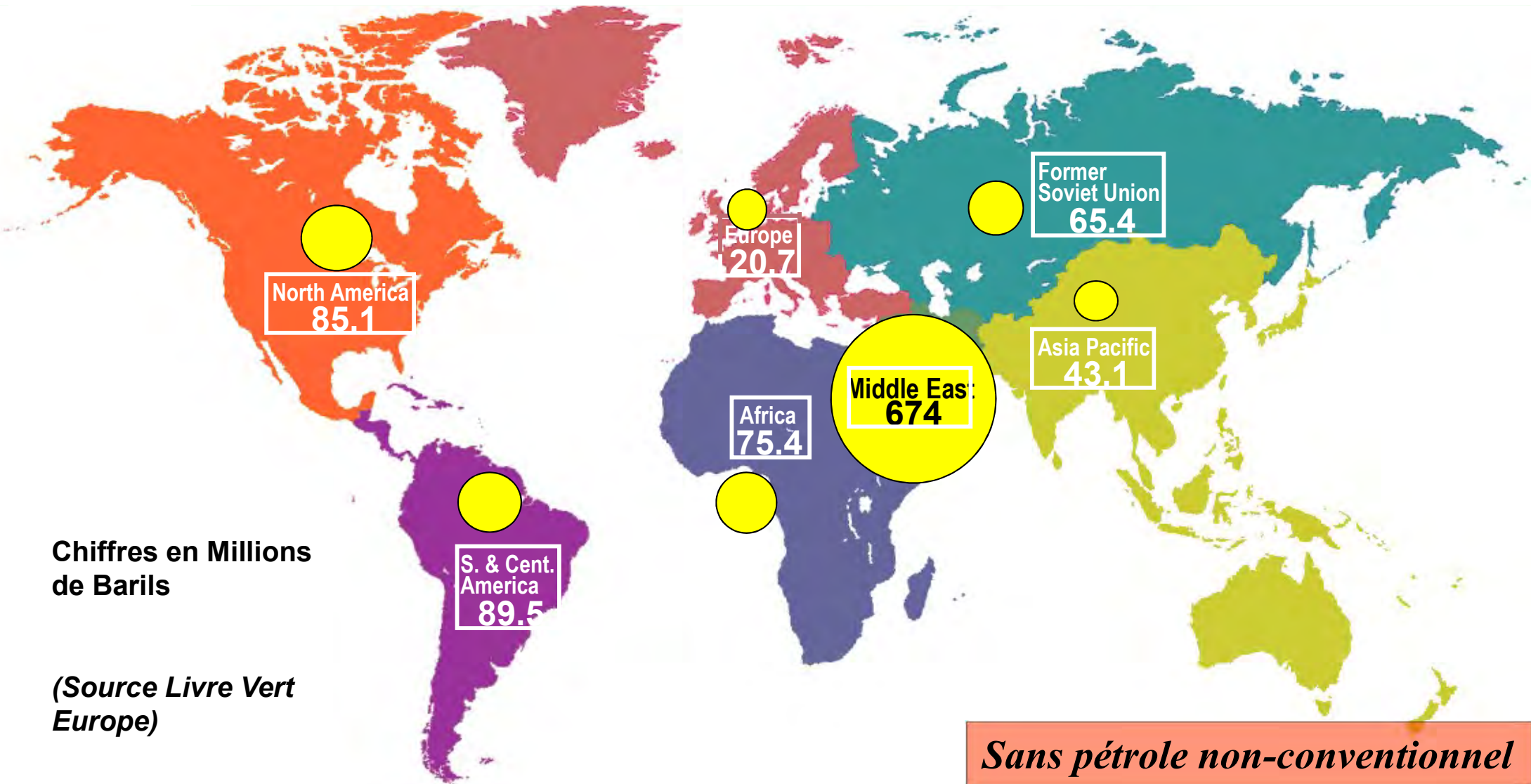
2 contraintes sur lesquelles il est possible d'agir



Quelles sont les ressources disponibles ?

Pétrole : ressources limitées et concentrées

Le Moyen Orient concentre 64% des réserves totales connues



Ressources en pétrole non-conventionnel

Les ressources en pétrole extra lourd et bitumineux se trouve essentiellement en Amérique

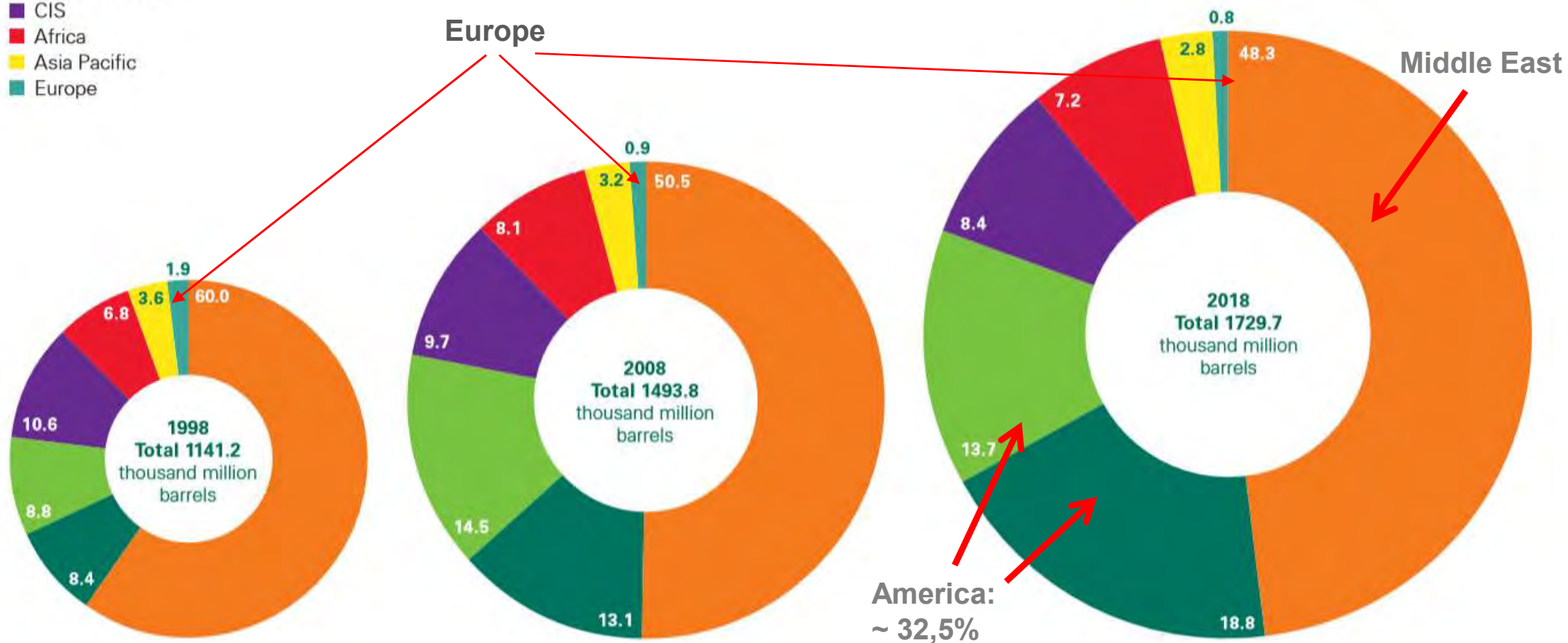


EHOB: Extra-heavy oil and bitumen

Evolution et répartition des réserves connues de pétrole

- Middle East
- S. & Cent. America
- North America
- CIS
- Africa
- Asia Pacific
- Europe

Avec le pétrole non-conventionnel

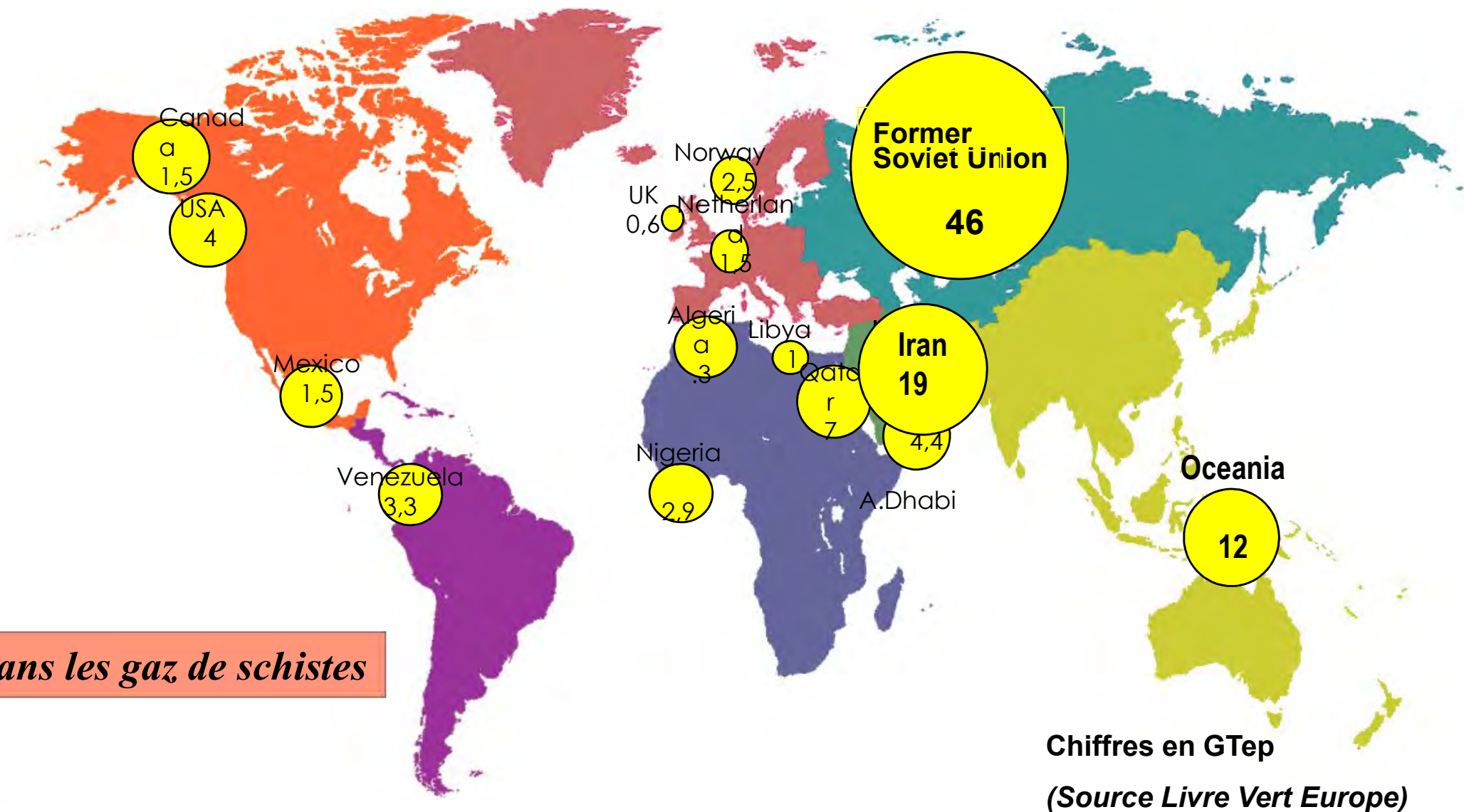


Percentage of total proved oil resources

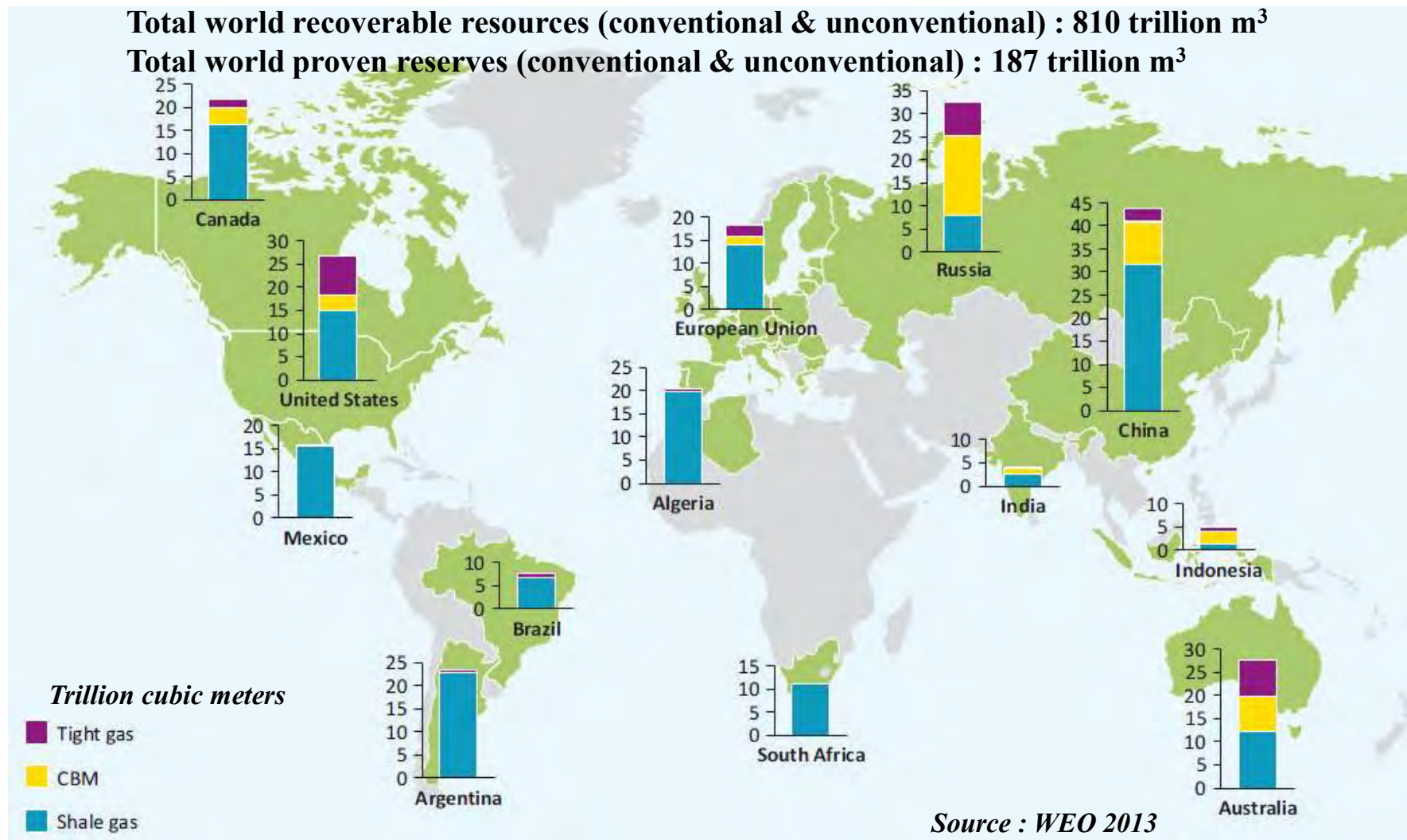
Source : BP Statistical Review of World Energy 2019

Gaz : ressources limitées et concentrées

La Russie et l'Iran concentrent l'essentiel des réserves totales connues



Ressources en gaz non-conventionnel (2012)



Recoverable resource = technically recoverable resources

Proven reserves = recoverable with the existing equipment and under the existing operating conditions

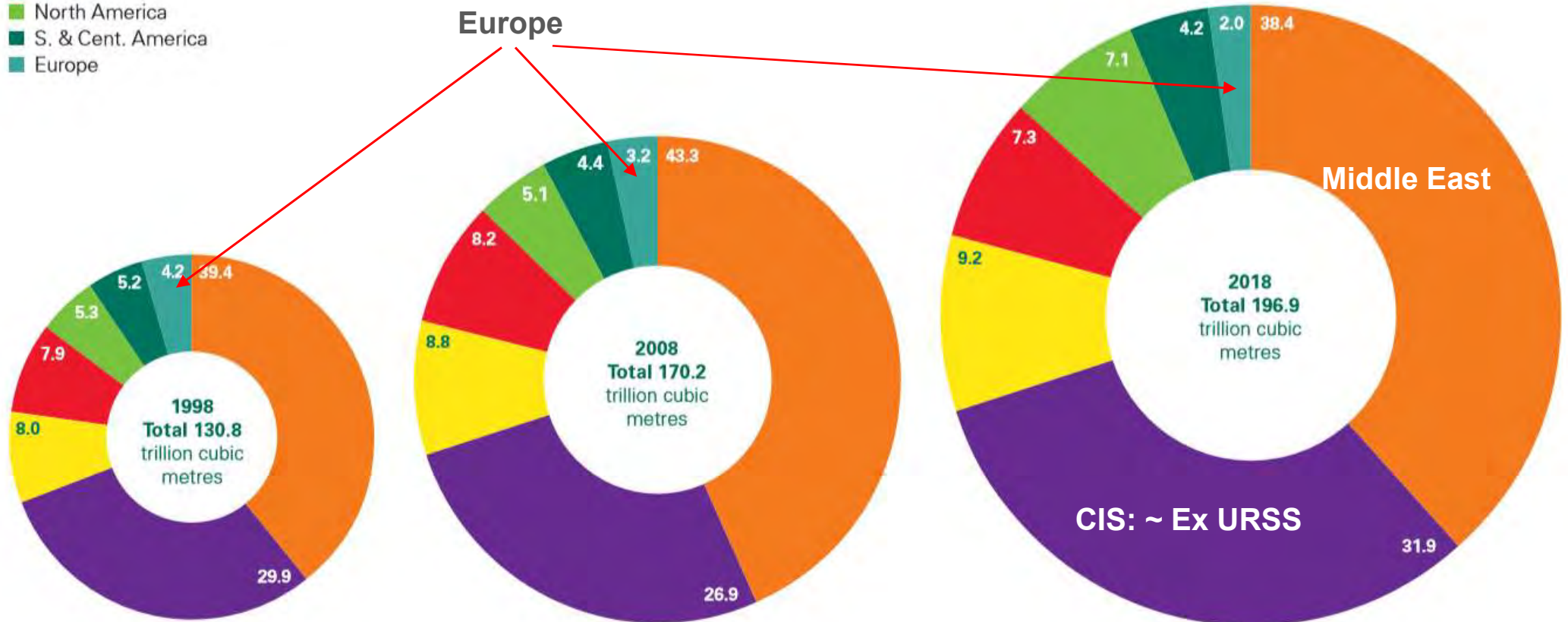
CBM: Coal bed methane

Le gaz non-conventionnel pourrait représenter plus de ¼ de la production totale de gaz en 2035

Evolution et répartition des réserves connues de gaz

- Middle East
- CIS
- Asia Pacific
- Africa
- North America
- S. & Cent. America
- Europe

Avec le gaz non-conventionnel

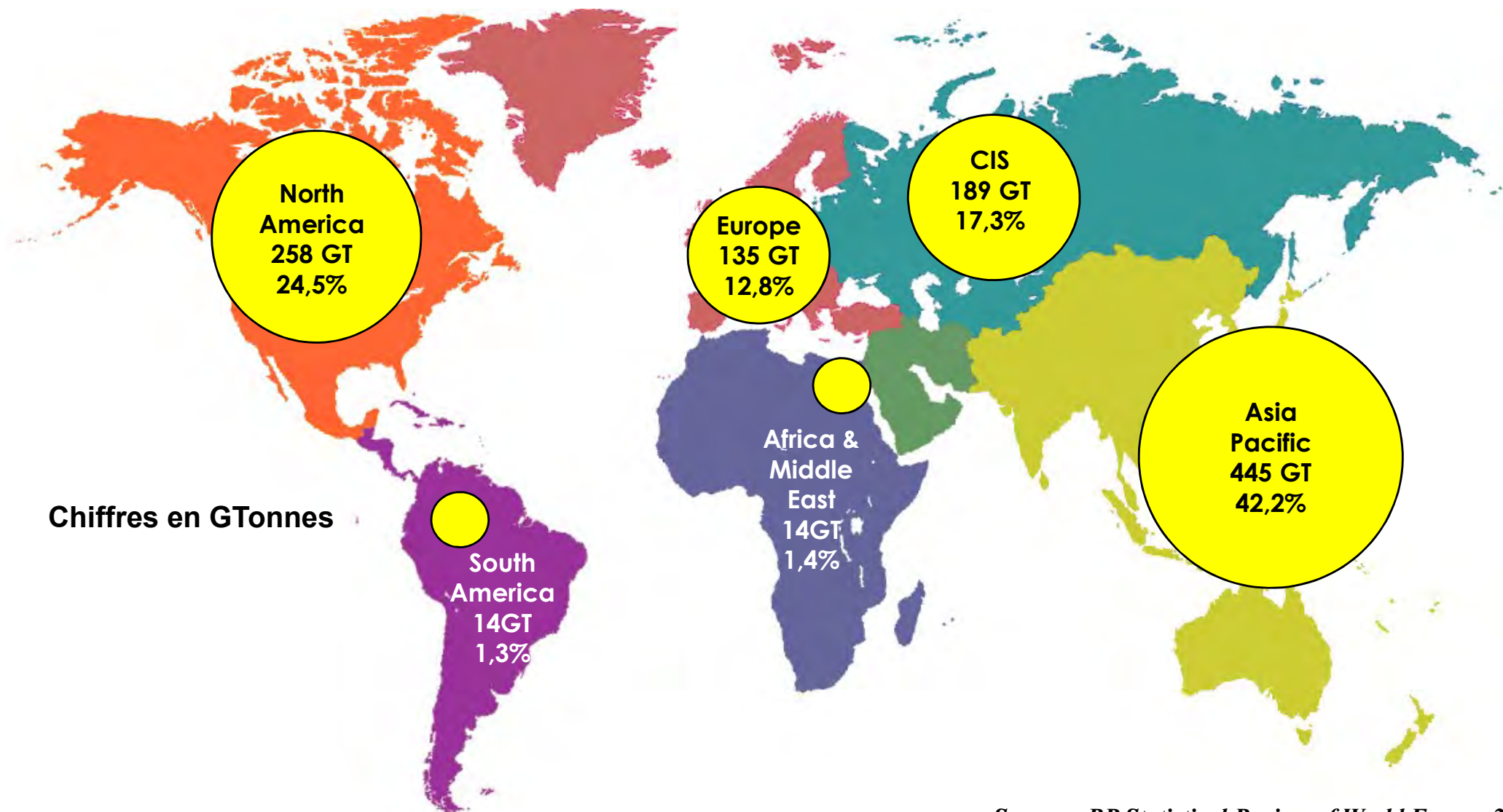


Percentage of total proved gas resources

Source : BP Statistical Review of World Energy 2019

Charbon : ressources importantes

Les réserves sont mieux réparties que le pétrole et le gaz



Chiffres en GTonnes

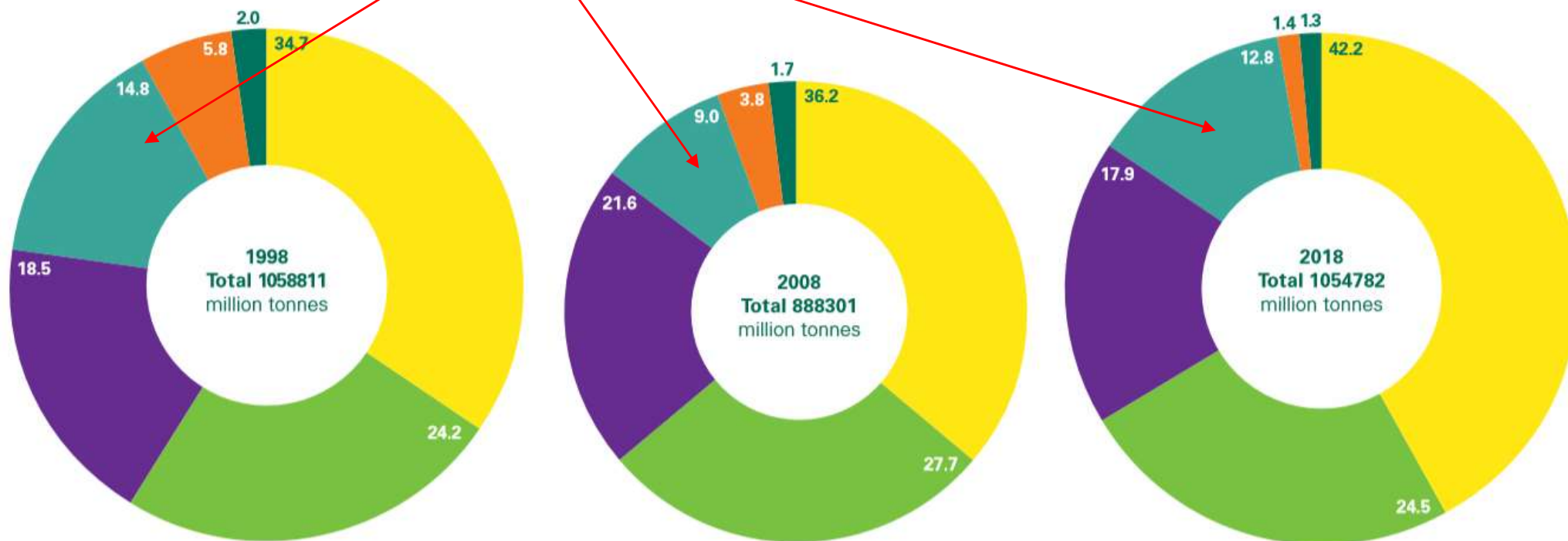
Source : BP Statistical Review of World Energy 2019

Evolution et répartition des réserves connues de charbon

De nouvelles réserves en Asie ont permis de retrouver le niveau des réserves connues il y a 20 ans

- Asia Pacific
- North America
- CIS
- Europe
- Middle East & Africa
- S. & Cent. America

Europe



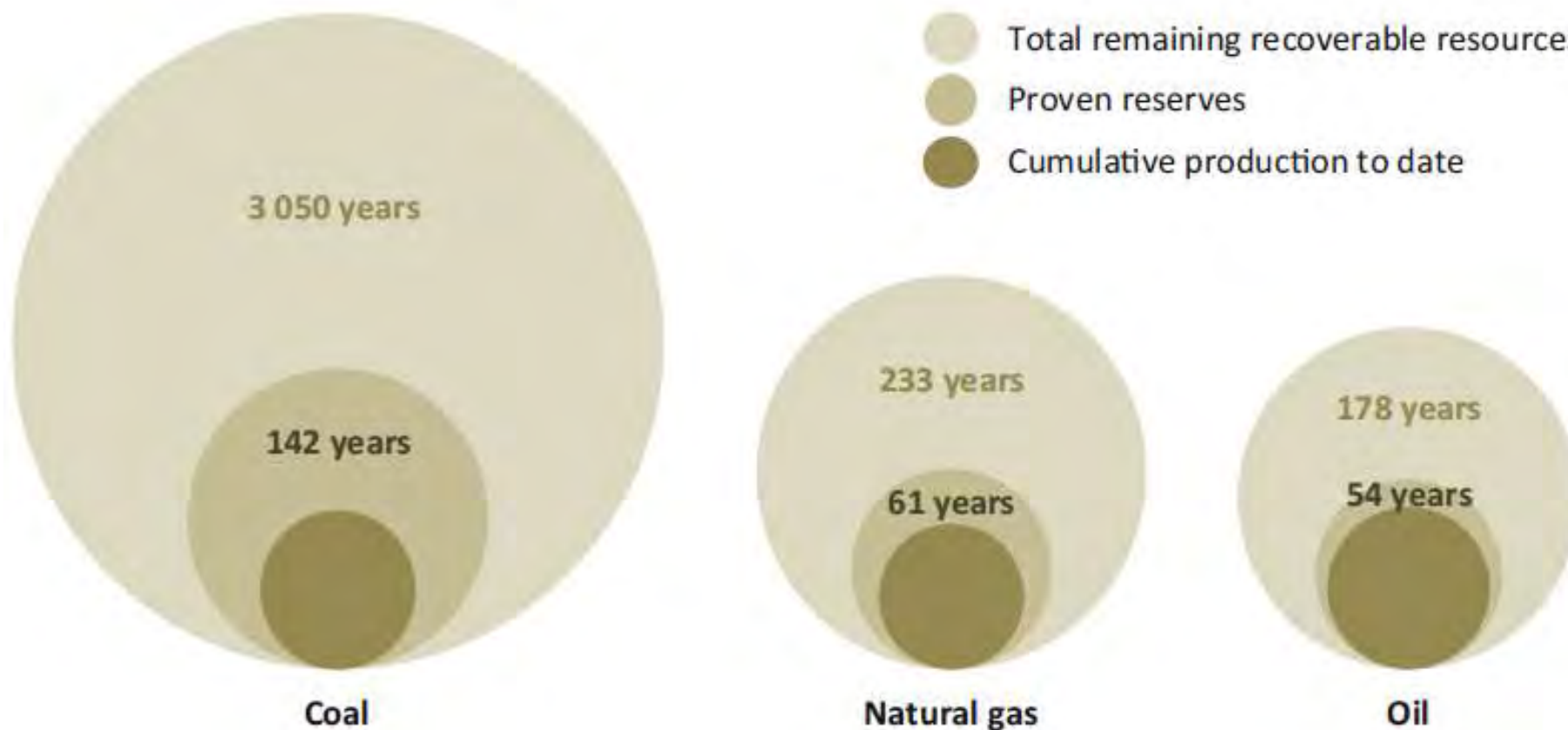
Percentage of total proved coal resources

Source : BP Statistical Review of World Energy 2019

Réserves mondiales de combustibles fossiles

Quelques décades pour le gaz et le pétrole, beaucoup plus pour le charbon

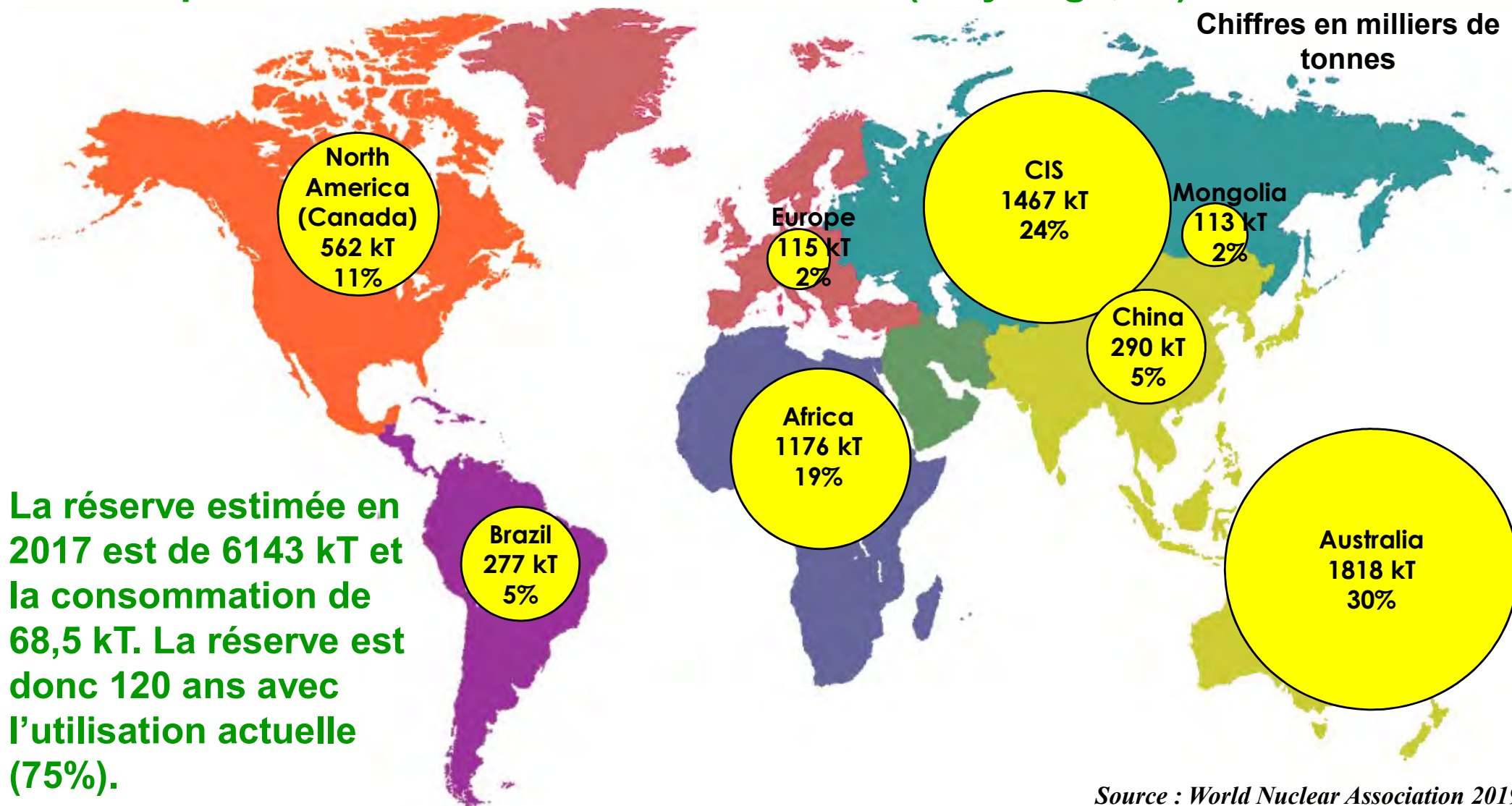
Conventionnel et non-conventionnel



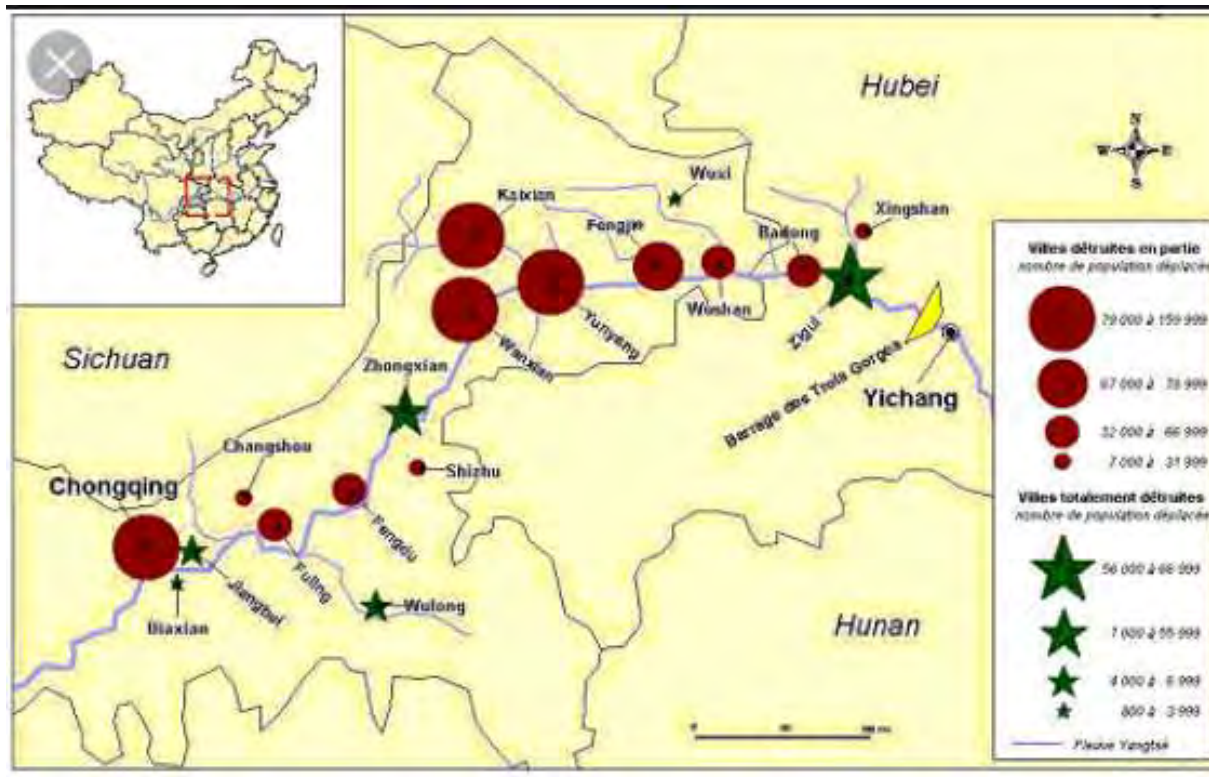
Source : World Energy Outlook 2013 © EIA

Uranium : ressources relativement bien réparties

La production annuelle mondiale couvre environ 75% de la consommation, le solde provient de ressources secondaires (recyclage, ...)



Hydraulique : 1ère source d'énergie renouvelable dans le monde



Impacts du barrage des Trois Gorges en Chine

L'hydroélectricité, avec 2,4%, est la 6ème source de production électrique mondiale après le pétrole (31,1%), le charbon (28,9%), le gaz (21,4%), l'énergie nucléaire (4,8%) et les biocarburants et biomasse (10,02%).

PAYS (top 10 des producteurs)	% d'hydroélectricité dans la production d'électricité nationale totale
Norvège	96.1
Brésil	68.6
Vénézuela	67.8
Canada	60.1
Russie	17.3
République populaire de Chine	16.9
France	13.2
Inde	11.9
Japon	8.1
États-Unis	6.7
Reste du monde	15.6
Monde	16.6

Source : AIE – Key World Energy Statistics 2015

Les autres énergies renouvelables: biomasse, solaire, éolienne, géothermique, ...

- Une éolienne terrestre à une puissance de 1,8 à 3 MWc pour une hauteur totale comprise entre 120 et 155 m. Une éolienne off-shore peut atteindre une puissance de 8 MWc.



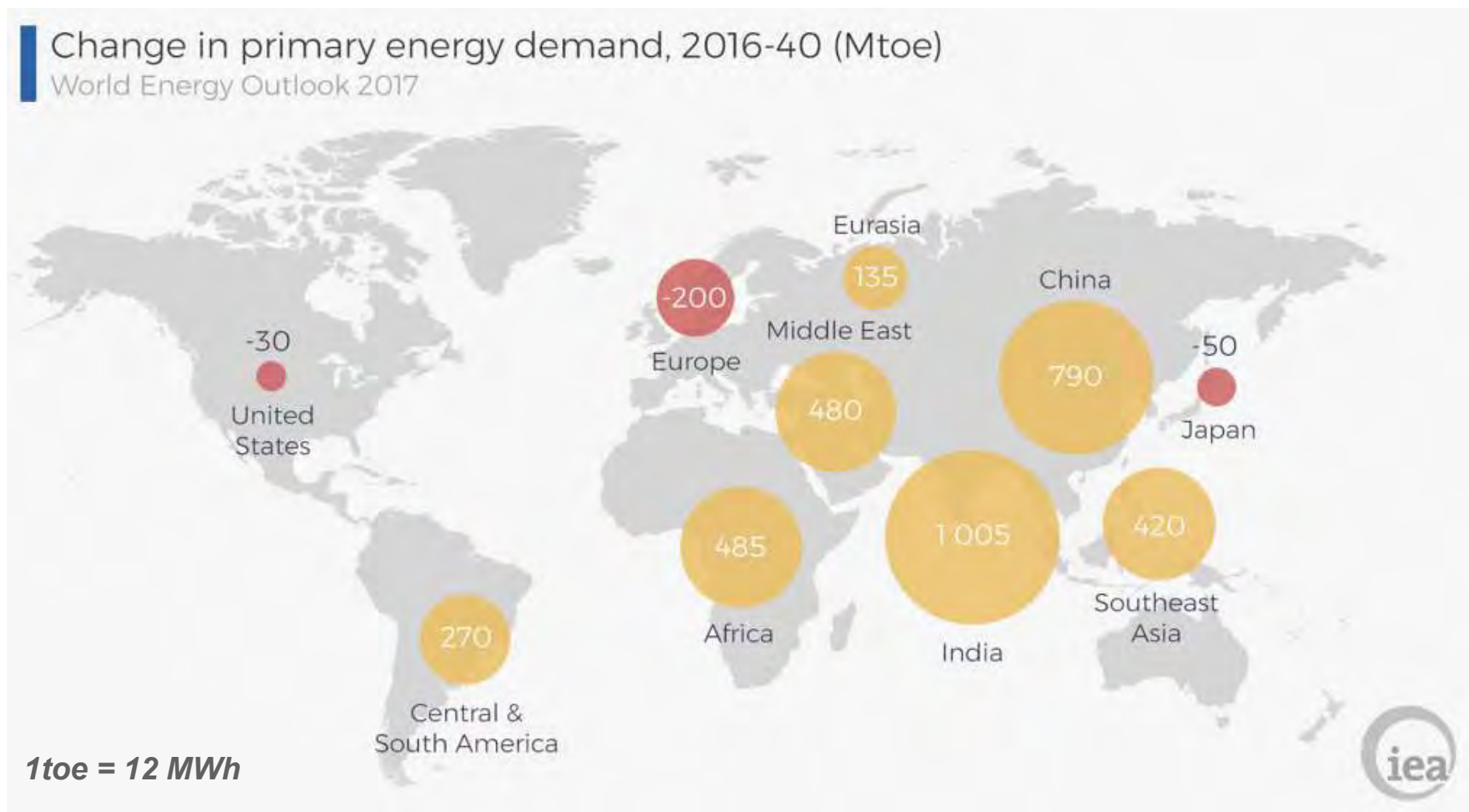
- Actuellement, un panneau photovoltaïque de 1 m² a une puissance de l'ordre de 100 à 130 Wc (dépend du type de cellule)
- En France, 1 m² de cellules photovoltaïques produit entre 100 et 130 kWh/an en moyenne

- La géothermie permet de produire différents types d'énergie en fonction de la température de la chaleur provenant du sous-sol. Elle est très dépendante du site.
- La biomasse provient de la forêt, de l'agriculture (cultures dédiées, résidus de culture, ...) et de déchets. Elle produit de l'énergie pour différents usages: chaleur, électricité, carburants.



Comment va évoluer la demande ?

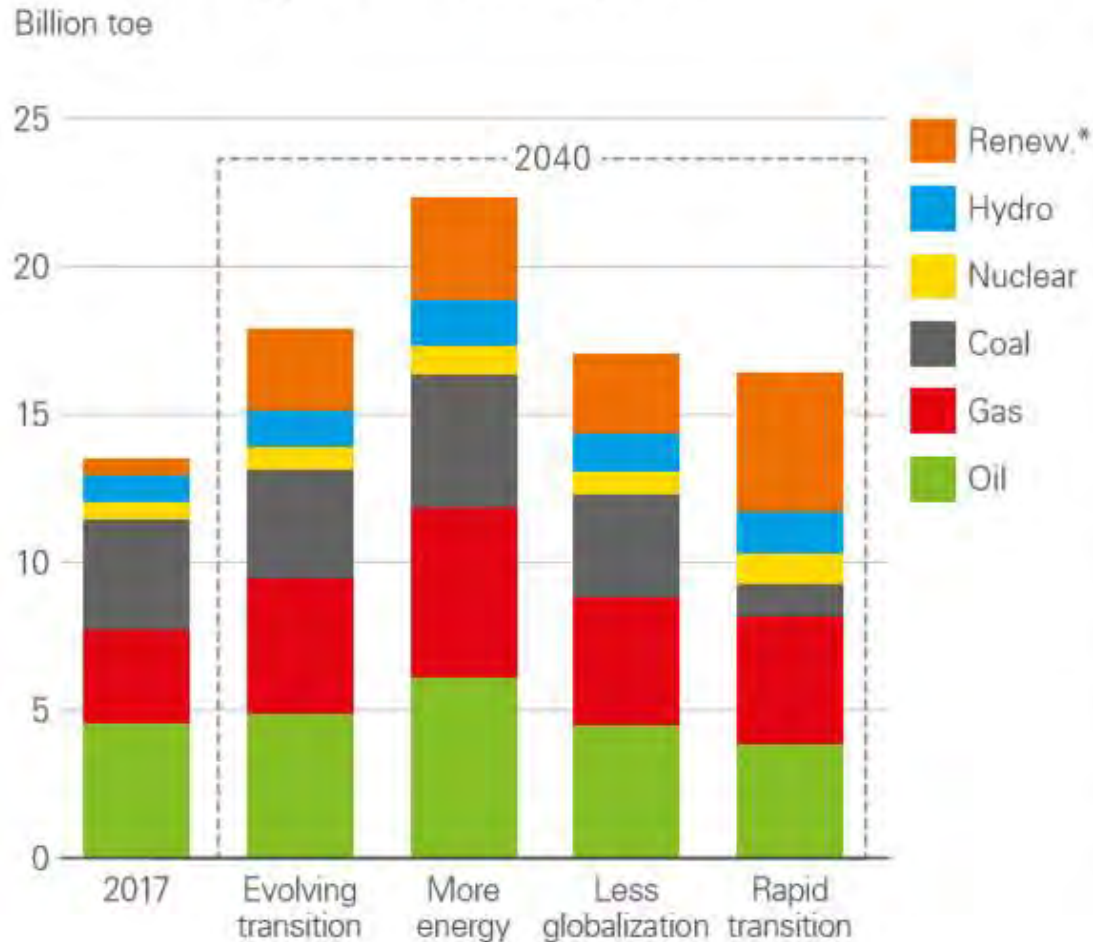
Evolution entre 2016 et 2040 de la demande en énergie primaire selon le scénario « New Policies » de l'AIE



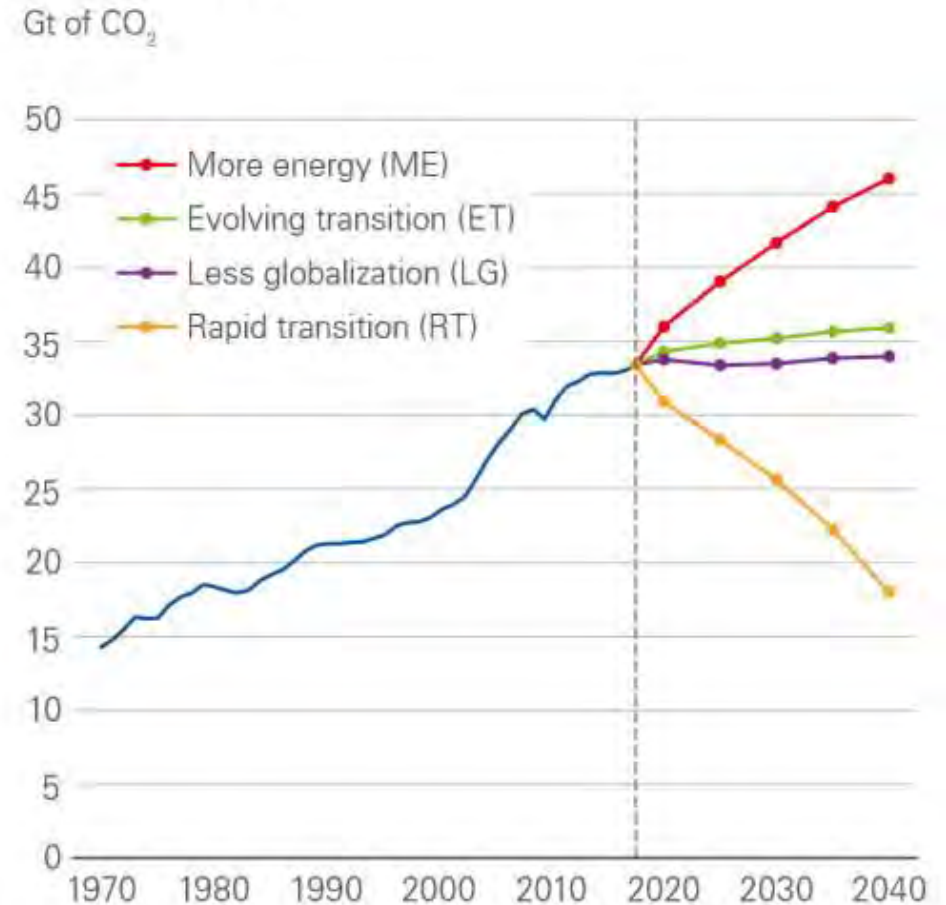
Si les pays de l'OCDE vont diminuer leurs consommations, il n'en est rien des autres, en particulier de la Chine et de l'Inde !

Evolution entre 2017 et 2040 de la demande en énergie primaire selon les scénarios « BP Energy Outlook 2019 »

Primary energy consumption by fuel



CO₂ emissions



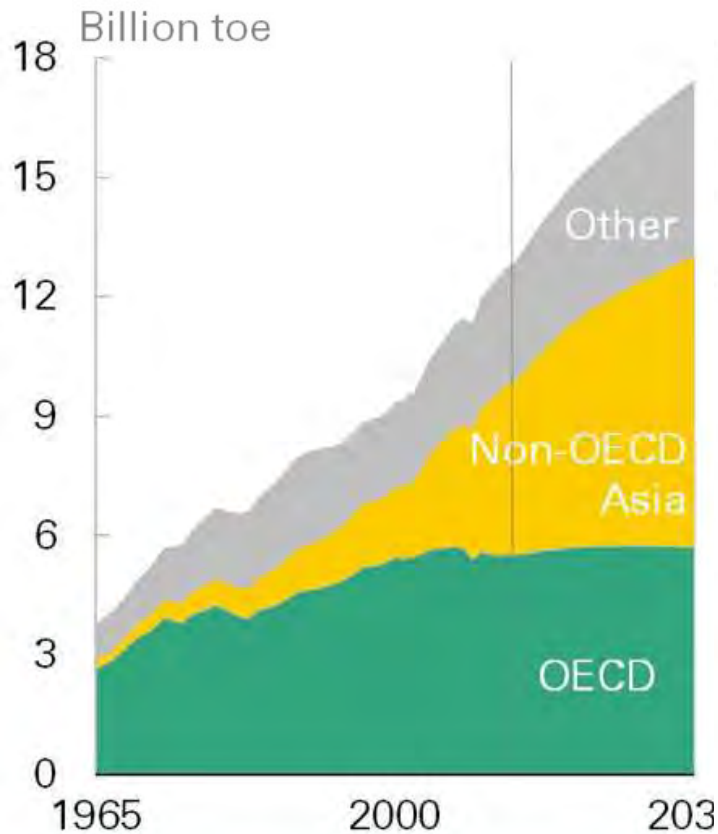
**A l'exception du scénario « RT », les énergies fossiles augmentent.
 Dans les 4 scénarios, le nucléaire, l'hydro et les renouvelables augmentent.**

*Renewables includes wind, solar, geothermal, biomass, and biofuels.

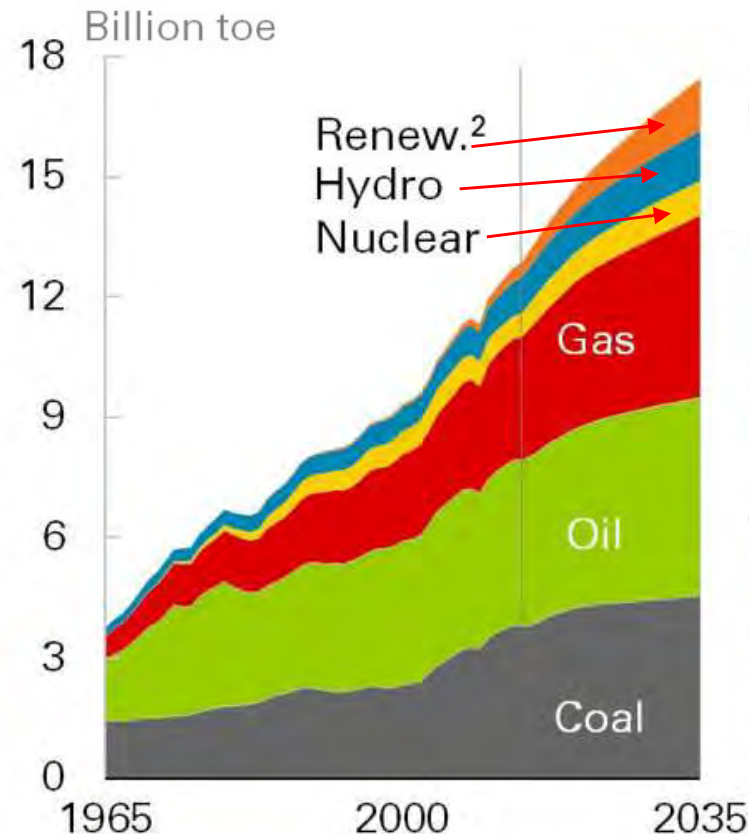
Source : BP Energy Outlook 2019

Quel que soit le scénario pour le futur, les combustibles fossiles vont probablement rester la source principale d'énergie ...

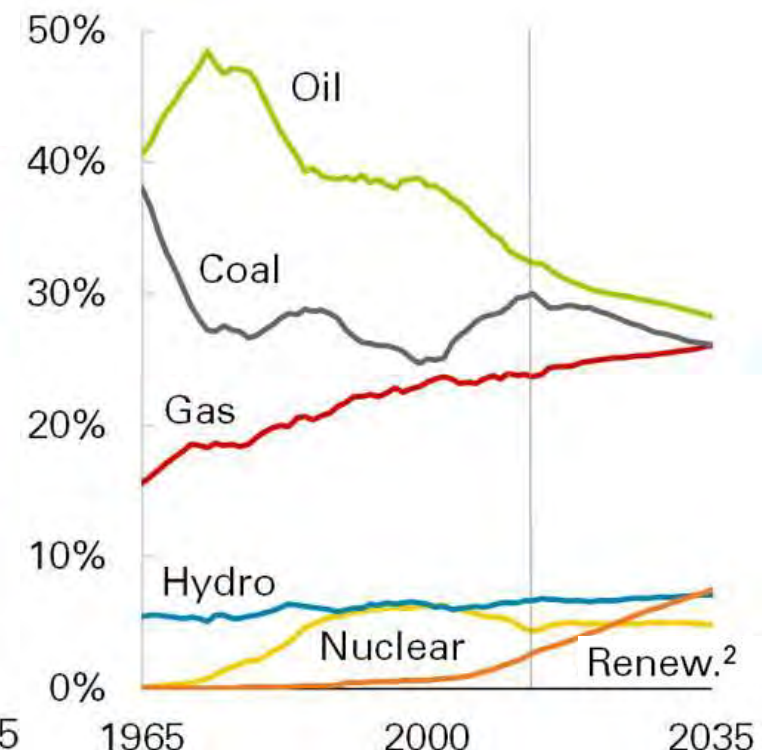
Consumption by region



Consumption by fuel¹



Fuel shares in primary energy



Source : BP Energy Outlook 2035

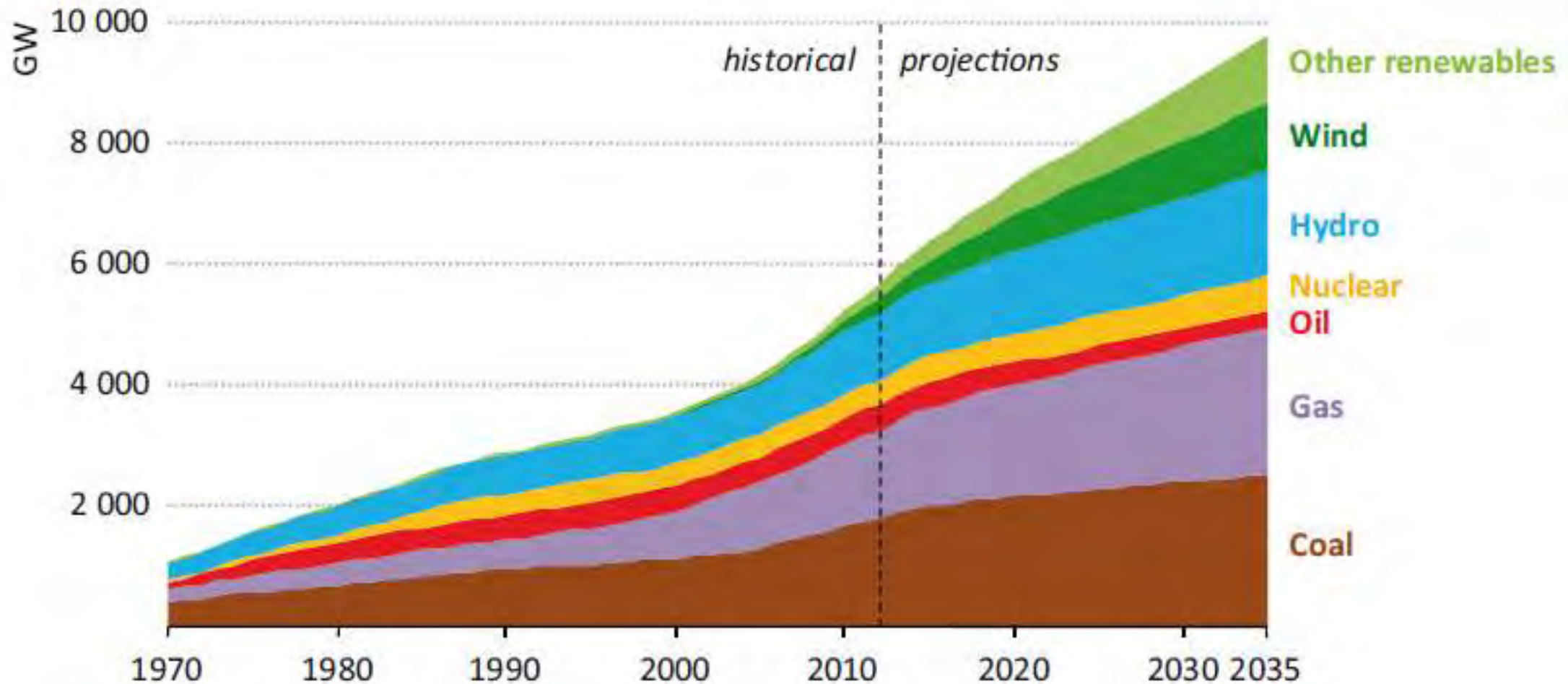
... et les émissions de CO₂ vont probablement augmenter !

¹Primary fuels in power allocated according to final sector electricity consumption

²Includes biofuels

Il en sera de même pour la production d'électricité

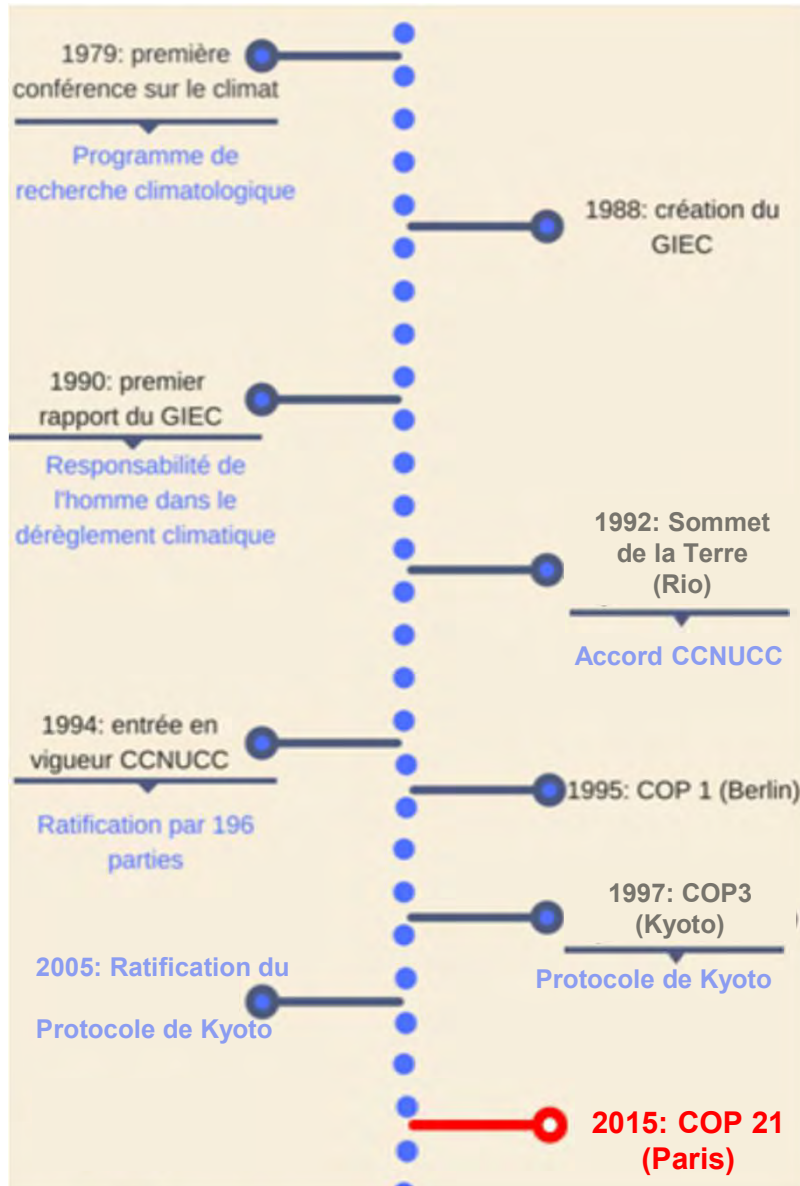
Combustible utilisé et capacité installée pour la production d'électricité selon le scénario « New Policies » de l'AIE



Source : World Energy Outlook 2013

**Heureusement, les
scientifiques ont réussi à
convaincre les politiques !**

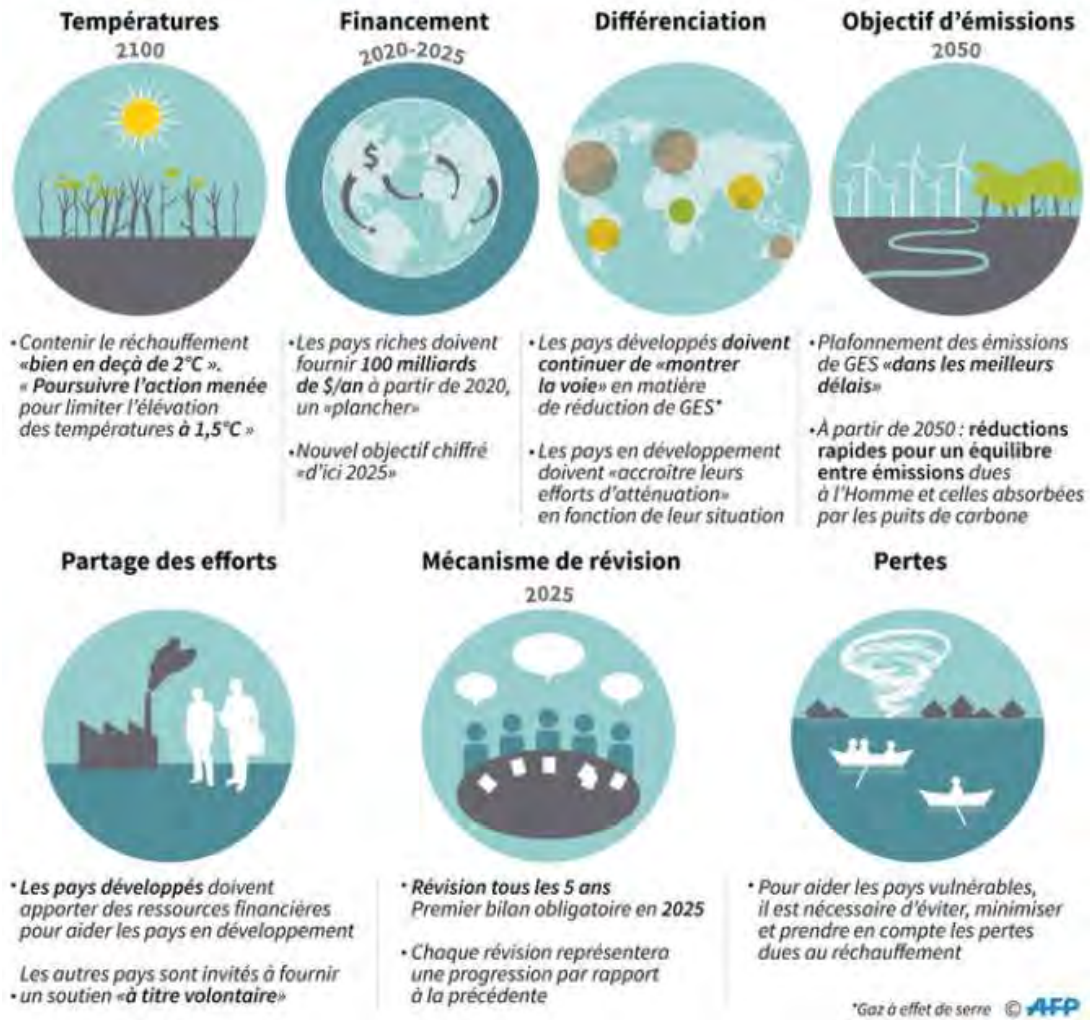
La prise de conscience politique



L'accord de Paris signé en 2015 est entré en vigueur le 4 novembre 2016

La COP 21

195 délégations réunies à Paris fin 2015 ont abouti au 1er accord universel contraignant sur le climat.



L'accord est entré en vigueur le 4 novembre 2016, soit 30 jours après sa ratification par au moins 55 parties représentant 55 % des émissions de gaz à effet de serre.

Cependant, aucune mesure coercitive (amende ou mesure de rétorsion) ne l'accompagne.

Les points clés de l'accord

Application de l'accord de Paris ?



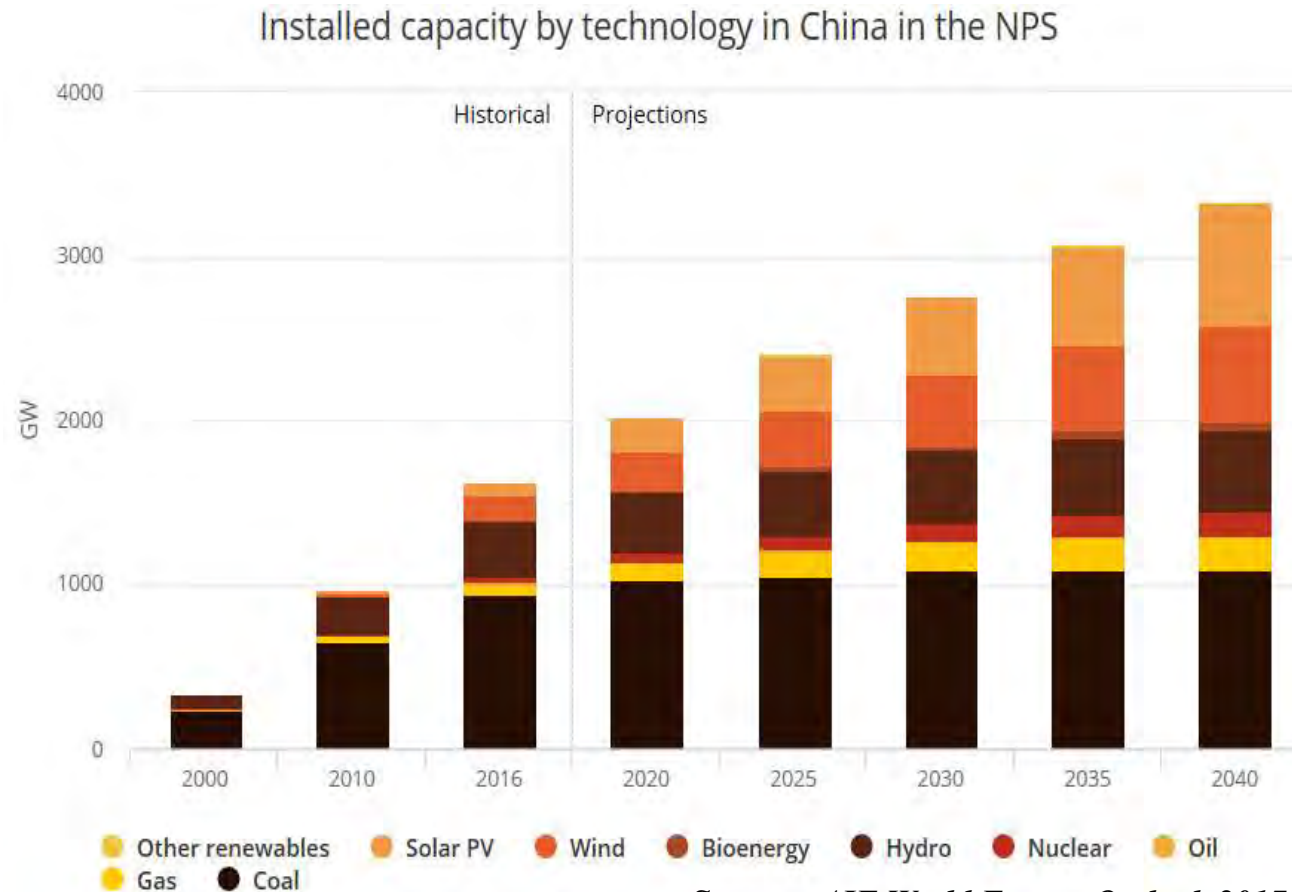
Quand la Chine change, tout change, ...



Appel du président chinois, Xi Jinping, à une «**révolution énergétique**» et à la «**lutte contre la pollution**». Il en résulte une politique énergétique axée sur l'électricité et le gaz naturel.

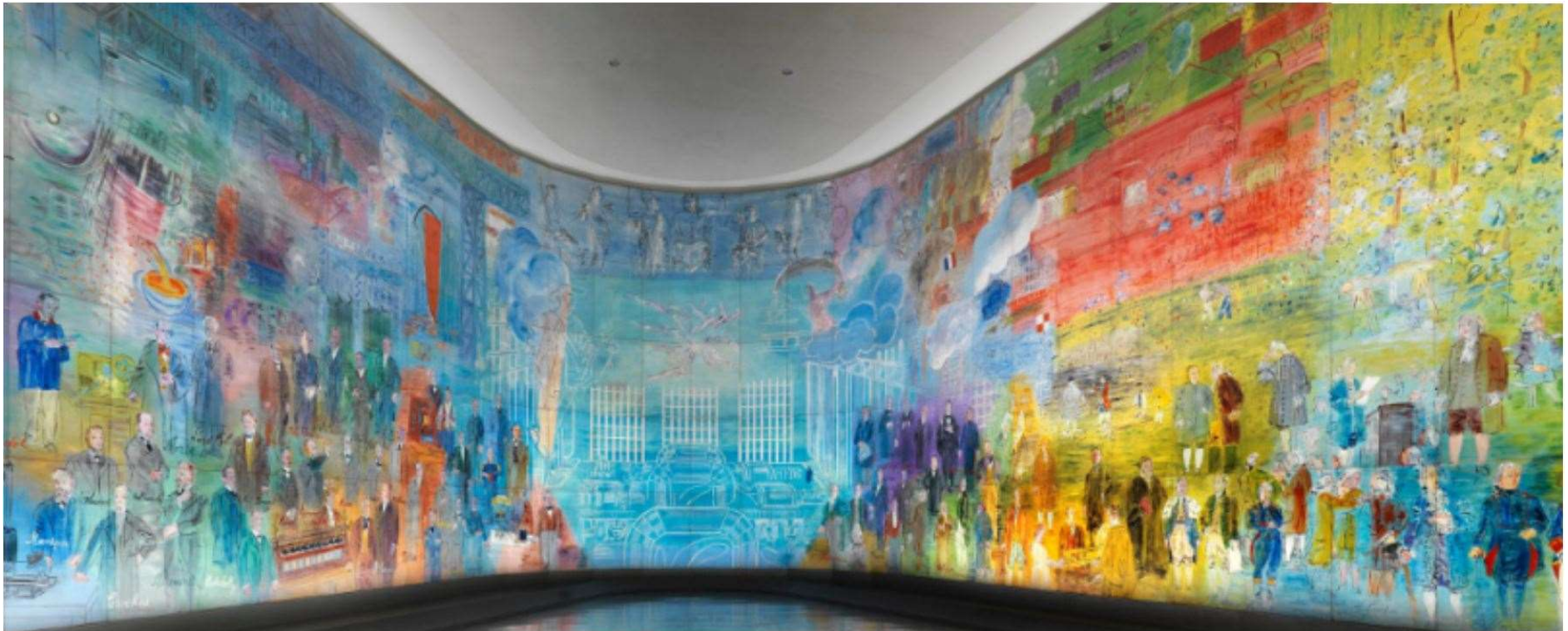
La Chine représente aujourd'hui plus de 40% des investissements mondiaux dans les véhicules électriques.

Les choix de la Chine joueront un rôle déterminant dans l'évolution des tendances mondiales et pourraient entraîner une transition plus rapide vers une énergie propre.



Source : AIE World Energy Outlook 2017

La fée « Electricité »



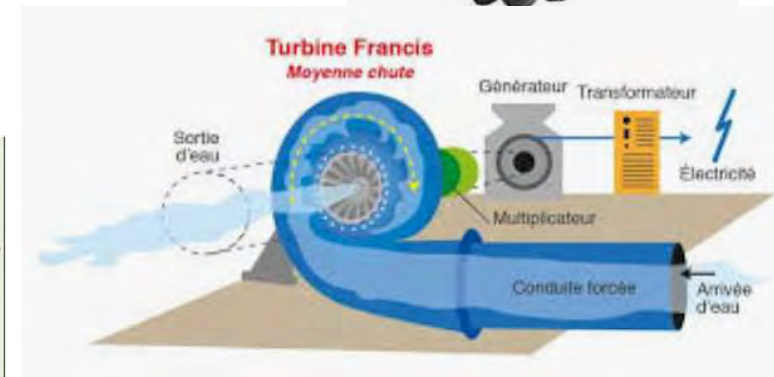
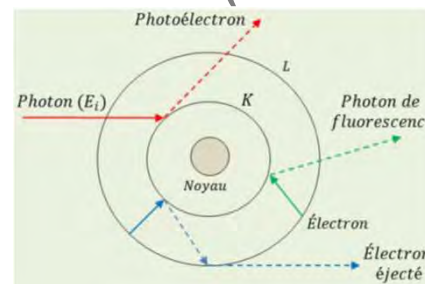
*Tableau de Raoul Dufy, 1937
Musée d'Art moderne de Paris*

L'électricité, une énergie bien particulière

L'électricité n'est pas une énergie primaire

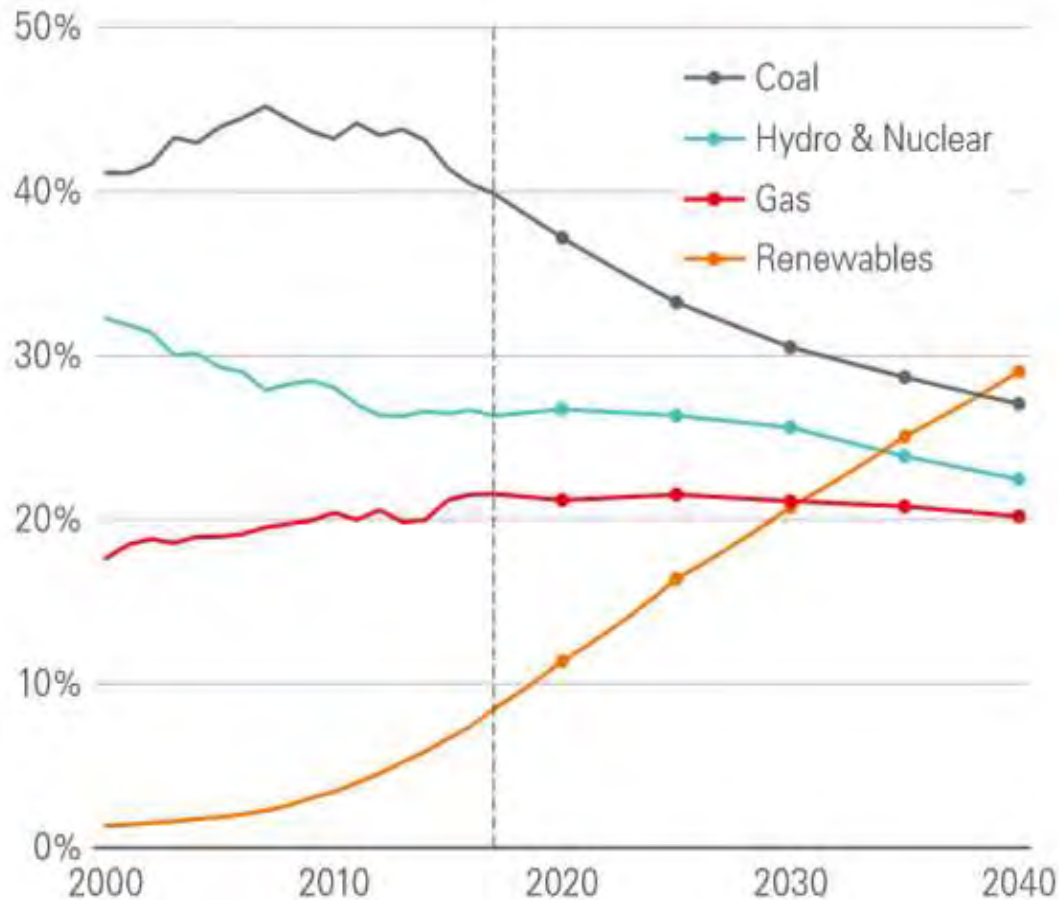
Elle est produite à partir d'une énergie primaire soit par

- transformation de la chaleur en énergie mécanique puis électrique
 - dans le cas de la combustion des énergies fossiles ou biomasse
 - ou dans le cas de la fission nucléaire
- transformation de l'énergie potentielle en en énergie mécanique puis électrique (hydraulique)
- transformation directe de l'énergie mécanique (éolienne, hydraulienne, ...)
- transformation de l'énergie de la lumière (effet photoélectrique): photovoltaïque

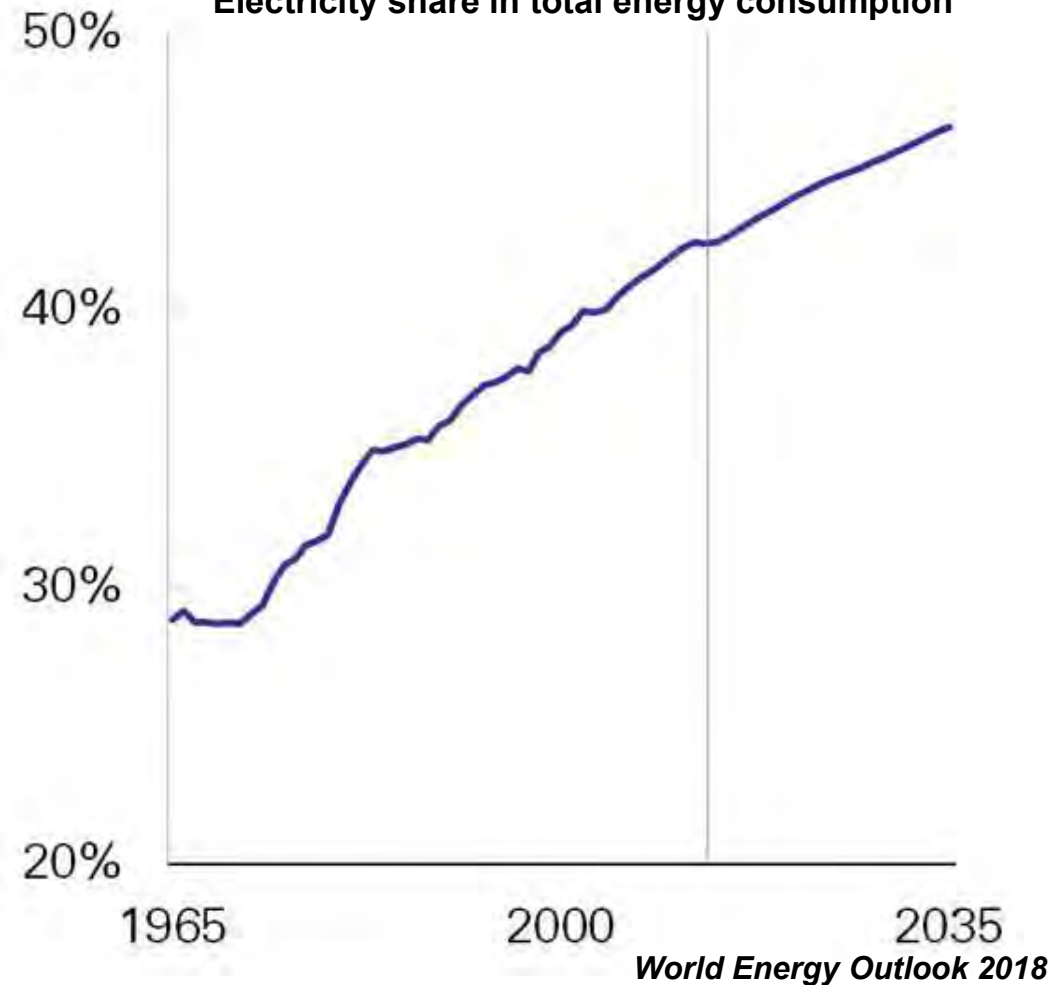


L'électricité ne se stocke pas sous sa forme électricité

Production d'électricité dans le monde: 26615 TWh



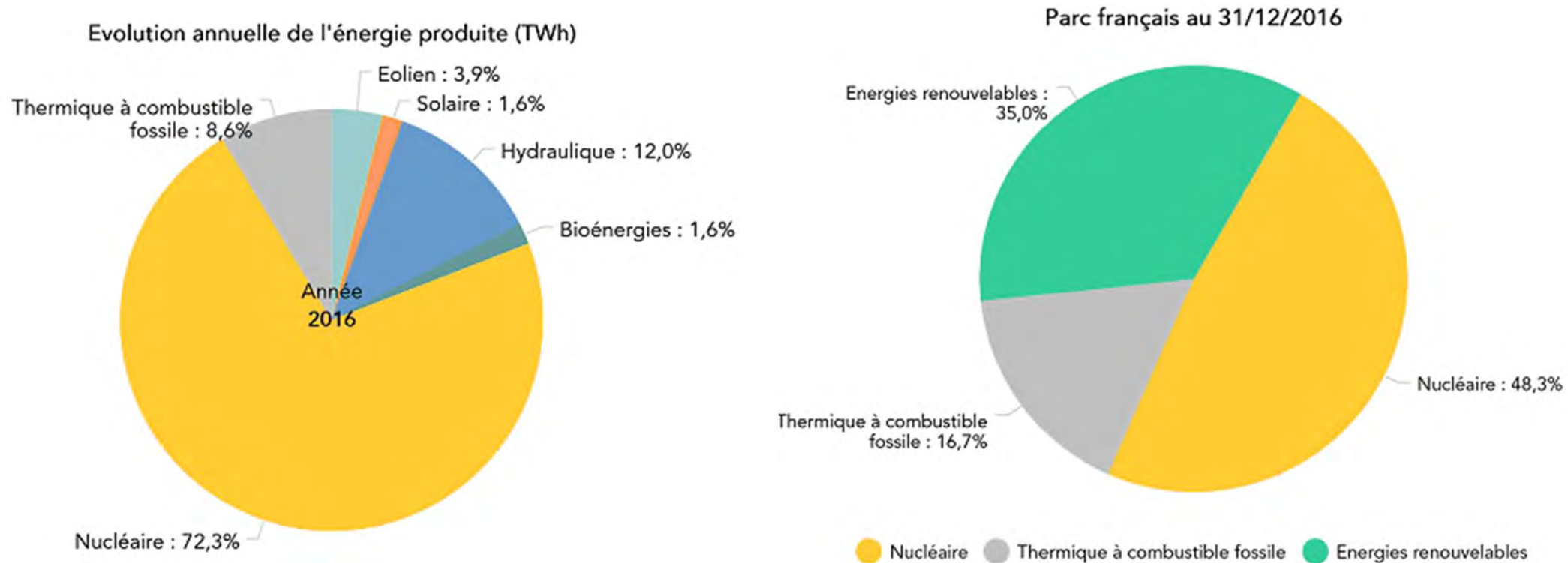
Electricity share in total energy consumption



En 2040, la production d'électricité par les énergies renouvelables devraient dépasser la production traditionnelle et représenter près de 50% de la consommation totale d'énergie

La production d'électricité en France

La production française d'électricité est relativement stable depuis plusieurs années aux alentours de 550 TWh par an (531 TWh en 2016)



L'essentiel de la production à partir des énergies renouvelables est assuré par l'hydraulique.

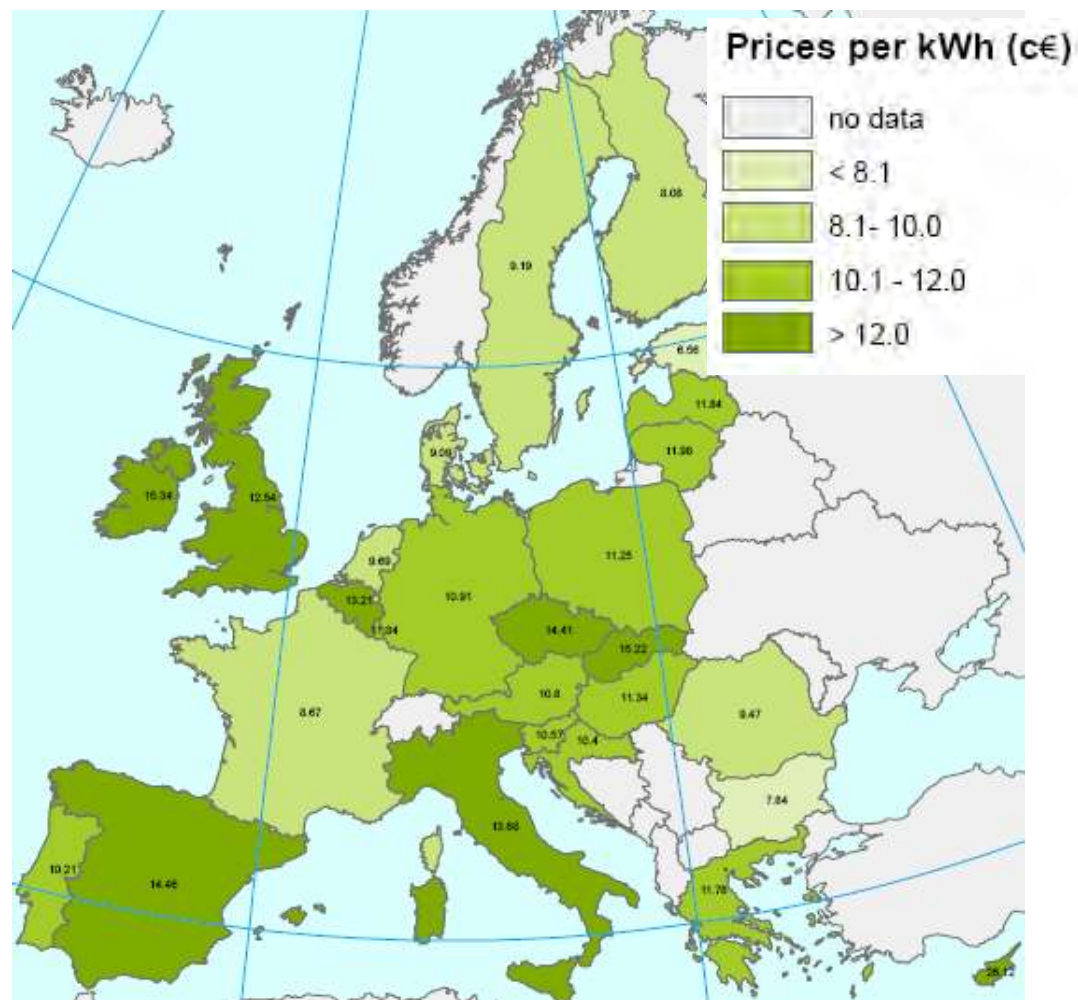
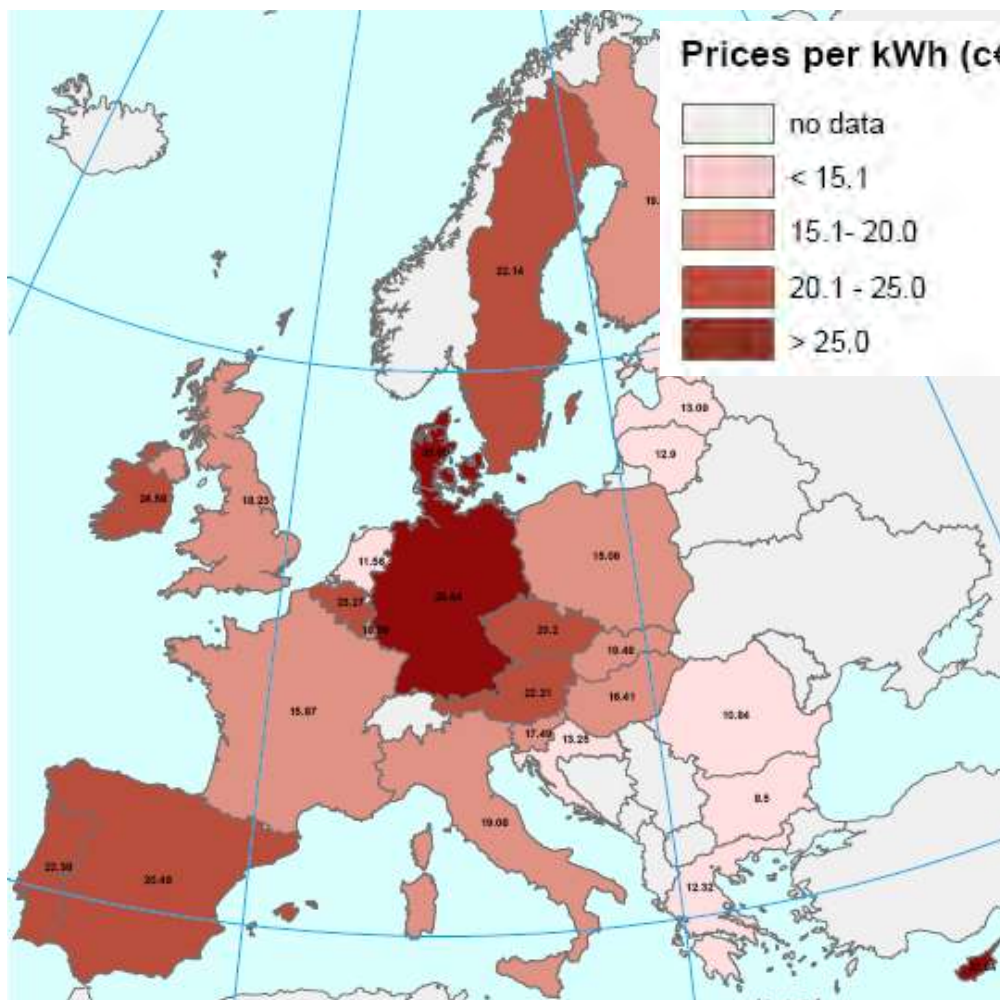
La comparaison des 2 graphiques illustre l'intermittence des énergies renouvelables.

La Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) prévoit l'arrêt de la production d'électricité à partir de charbon à l'horizon 2023.

Quels prix ?

Tarif pour les particuliers (TTC)

Tarif pour les industriels (TTC)

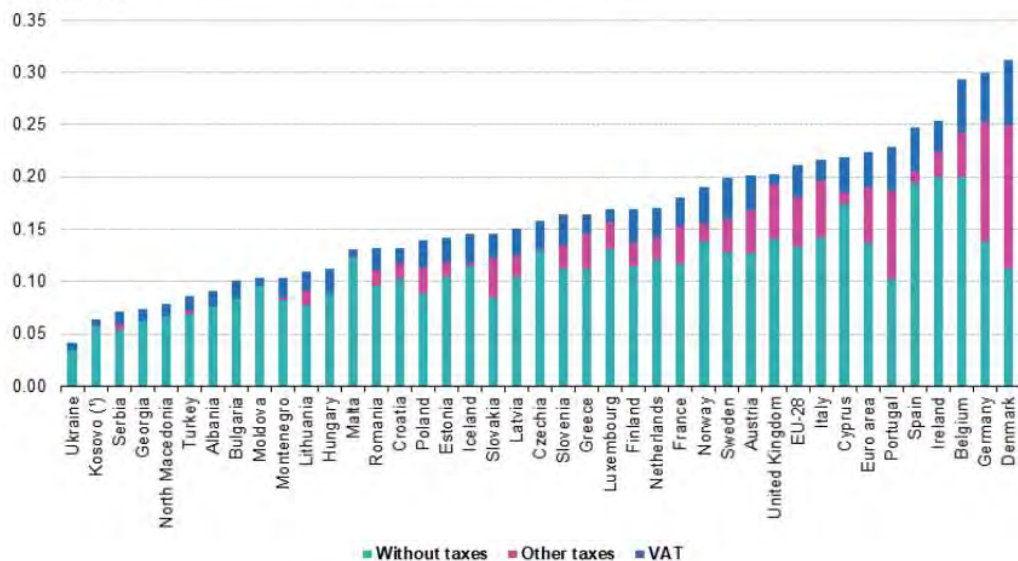


Prix de l'électricité

Tarif pour les particuliers (€/kWh - TTC)

Tarif pour les industriels (€/kWh – hors TVA)

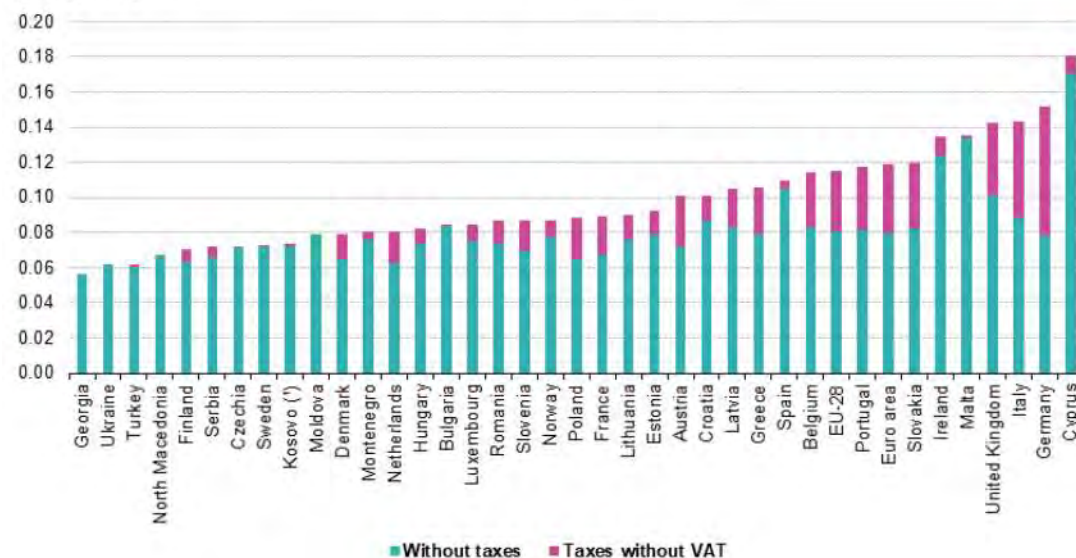
Electricity prices for household consumers, second half 2018
(EUR per kWh)



(*) This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo Declaration of Independence.

Source: Eurostat (online data codes: nrg_pc_204)

Electricity prices for non-household consumers, second half 2018
(EUR per kWh)



(*) This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo Declaration of Independence.

Source: Eurostat (online data codes: nrg_pc_205)

Production d'électricité: l'énergie nucléaire

Avec une production de 2 606 TWh en 2016 (soit 10,4 % de la production mondiale d'électricité), le nucléaire est la 3e source de production d'électricité dans le monde

En France, la production nette d'électricité d'origine nucléaire s'est élevée à 384 TWh en 2016, soit 72.3 % de la production totale

L'énergie nucléaire présente plusieurs atouts:

- bilan carbone excellent
- production d'une très grande quantité d'énergie
- combustible bien réparti et peu cher
- fonctionnement quasi permanent qui assure une production de base stable
- très compétitive

Elle a aussi des inconvénients:

- un coût d'investissement élevé
- un niveau de risque qui génère des mesures de sûreté importantes
- une production de déchets radioactifs qui nécessite un traitement approprié



L'acceptation reste sans doute le problème majeur

Autres applications de l'énergie nucléaire

Paper manufacture

- Paper Mill
- Heating

Oil-producing

- Refining
- De-sulfurisation of crude oil
- Gas production
- Coal gasification
- Extraction of bitumen

Cement works

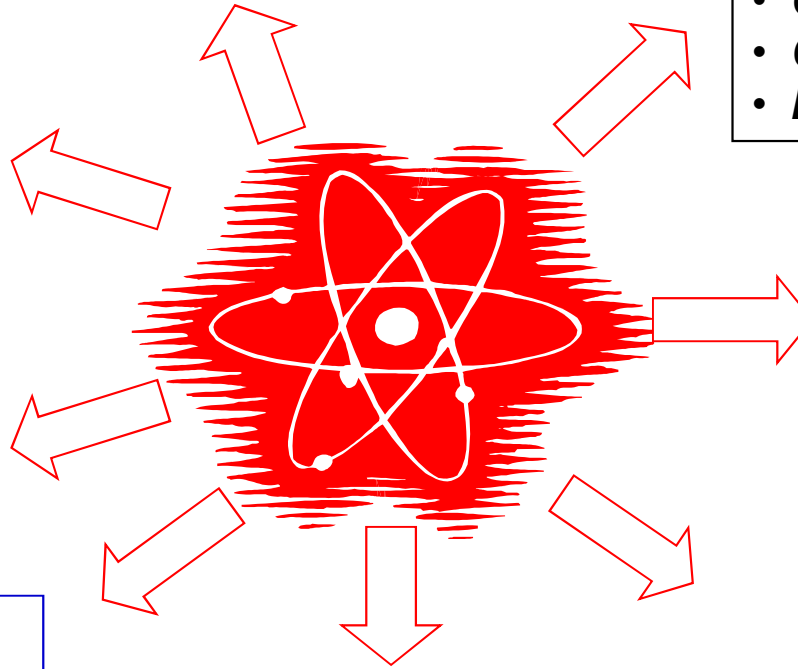
- Production of cement

Electricity

- Production of electricity

Other industries

- Production of other metals (aluminium, ...)
- Glass manufacturing



Iron industries

- Steel Production

Others

- Sea water desalination
- District Heating

Chemical industries

- Production of hydrogen
- Production of ethylen
- Production of styren
- ...

Production d'électricité: le solaire photovoltaïque

La puissance installée mondiale en matière de solaire photovoltaïque s'élève en 2016 à 303 GW

En France, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, promulguée le 18 août 2015, fixe pour objectif d'atteindre 32 % d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie en 2030

En France, en 2017, la capacité photovoltaïque installée était de 6,8 GW et la production d'électricité a été de 9,2 TWh, soit 1,7%

L'énergie solaire photovoltaïque présente plusieurs atouts:

- bilan carbone correct
- indépendance
- fonctionnement simple
- compétitivité de plus en plus grande

Elle a aussi des inconvénients:

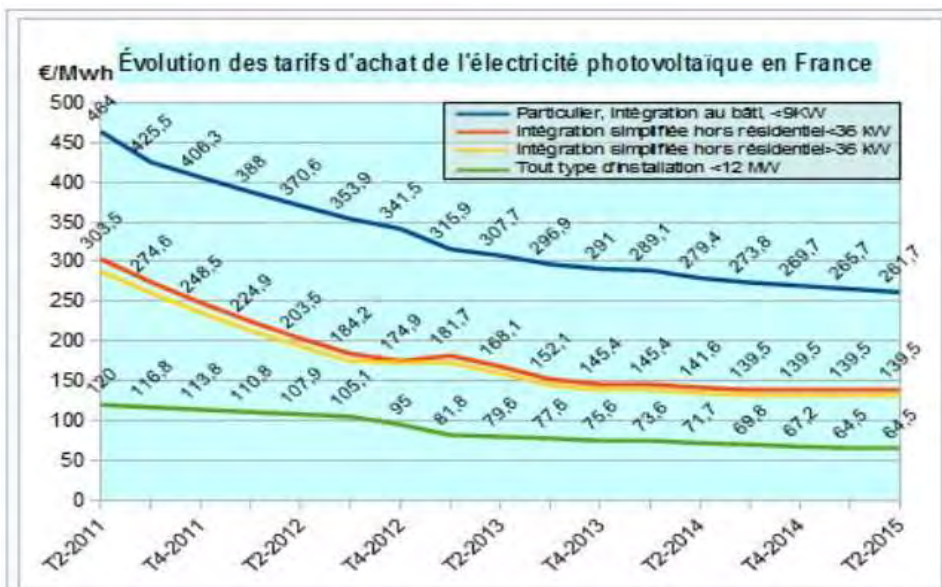
- l'intermittence
- une occupation au sol importante (~10000 m² pour une puissance de 1MW)
- une durée de vie de l'ordre de 20 ans (limite pour l'amortissement)



Parmi les énergies renouvelables, le solaire occupe encore une place minime mais connaît actuellement une très forte progression, notamment par l'autoconsommation

Production d'électricité: le solaire en autoconsommation

- Toute installation photovoltaïque implantée sur bâtiment dont la puissance installée est inférieure à 100 kWc est éligible à l'obligation d'achat (arrêté tarifaire du 9 mai 2017 fixant les conditions d'achat pour la filière photovoltaïque).
- Les tarifs d'achat sont auto-ajustables chaque trimestre en fonction des demandes de raccordement déposées au cours des trimestres précédents pour tenir compte du progrès technologique.



Évolution des tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque en France

source données : Commission de régulation de l'énergie ^{35, 36, 37}



Production d'électricité: l'éolien

En 2016, le parc éolien mondial a produit 1003 TWh soit 4% de la production d'électricité mondiale (En Chine, l'éolien représente 237,07 TWh, soit 24,7% de la production mondiale).

En 2017, le parc éolien français a produit 24 TWh soit 4,5% de la production d'électricité nationale. Actuellement, le parc éolien français est exclusivement sur terre mais 6 parcs offshore, représentant une puissance totale de 3300 MWc, sont en cours de développement.

L'énergie éolienne a de sérieux atouts:

- bilan carbone excellent
- indépendance
- fonctionnement simple
- Assez bonne compétitivité

Elle a aussi des inconvénients:

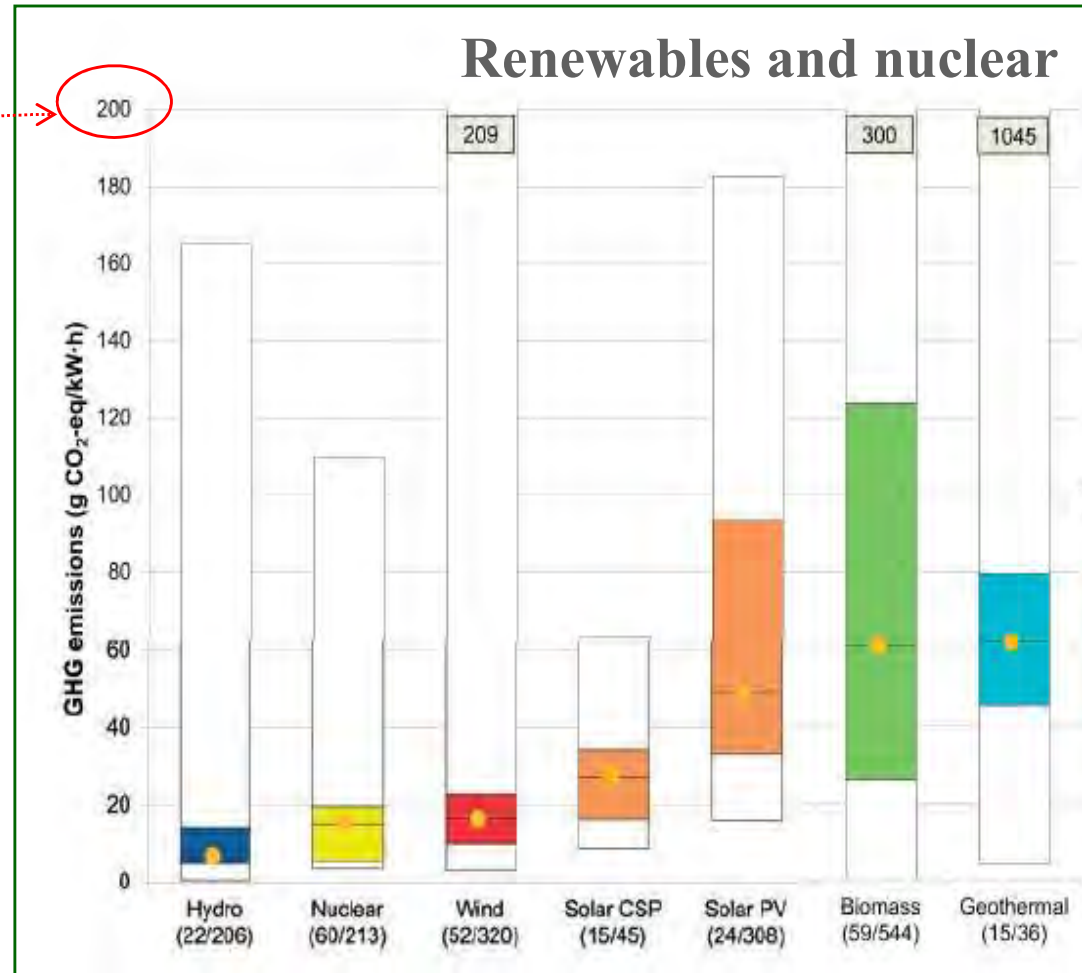
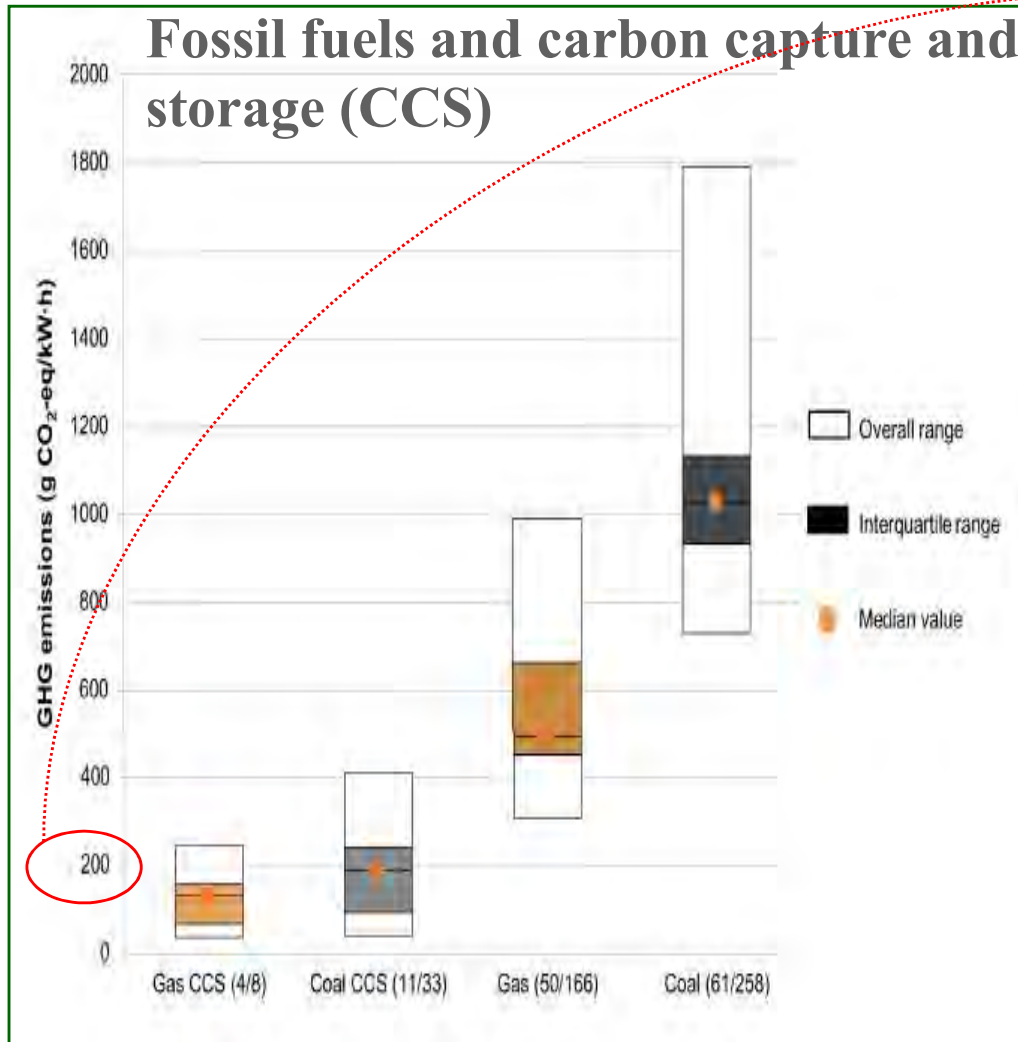
- l'intermittence
- une occupation au sol importante (330 éoliennes terrestres pour une puissance de 1000 MW)
- Un apport de nuisance (bruit, béton, voies d'accès)

Etant donné l'opposition de plus en plus vive aux projets terrestres, l'orientation est plutôt aujourd'hui aux projets offshore



Emission de gaz à effet de serre

GHG emissions from electricity generation sources



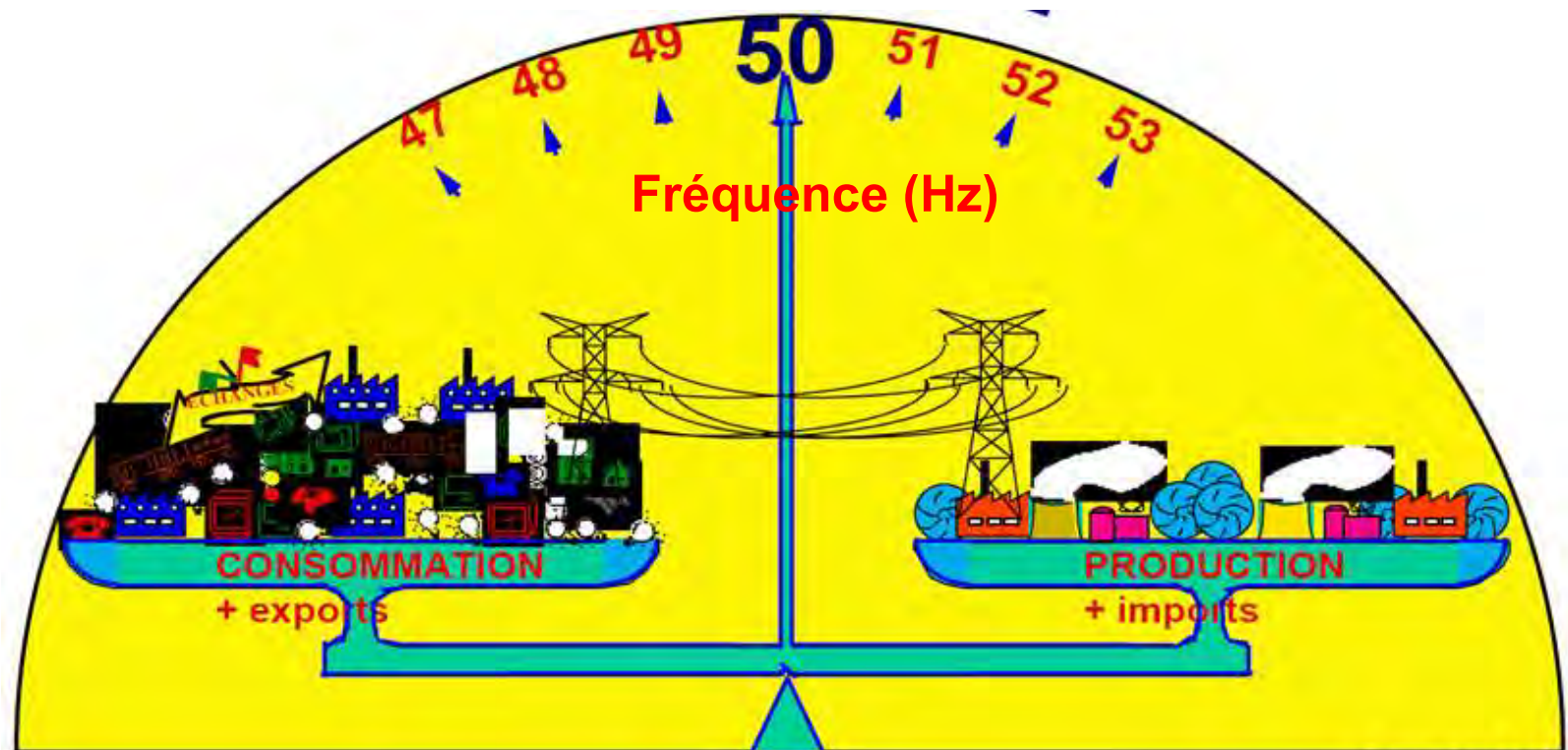
Source : IAEA 2014



Le réseau électrique (1/2)

L'électricité ayant pour particularité de ne pas pouvoir être stockée en grande quantité (barrages exceptés), la quantité d'électricité produite et injectée dans le réseau doit être égale à tout moment à la quantité d'électricité consommée.

Si l'équilibre était rompu, il ne serait plus possible d'alimenter certains clients.

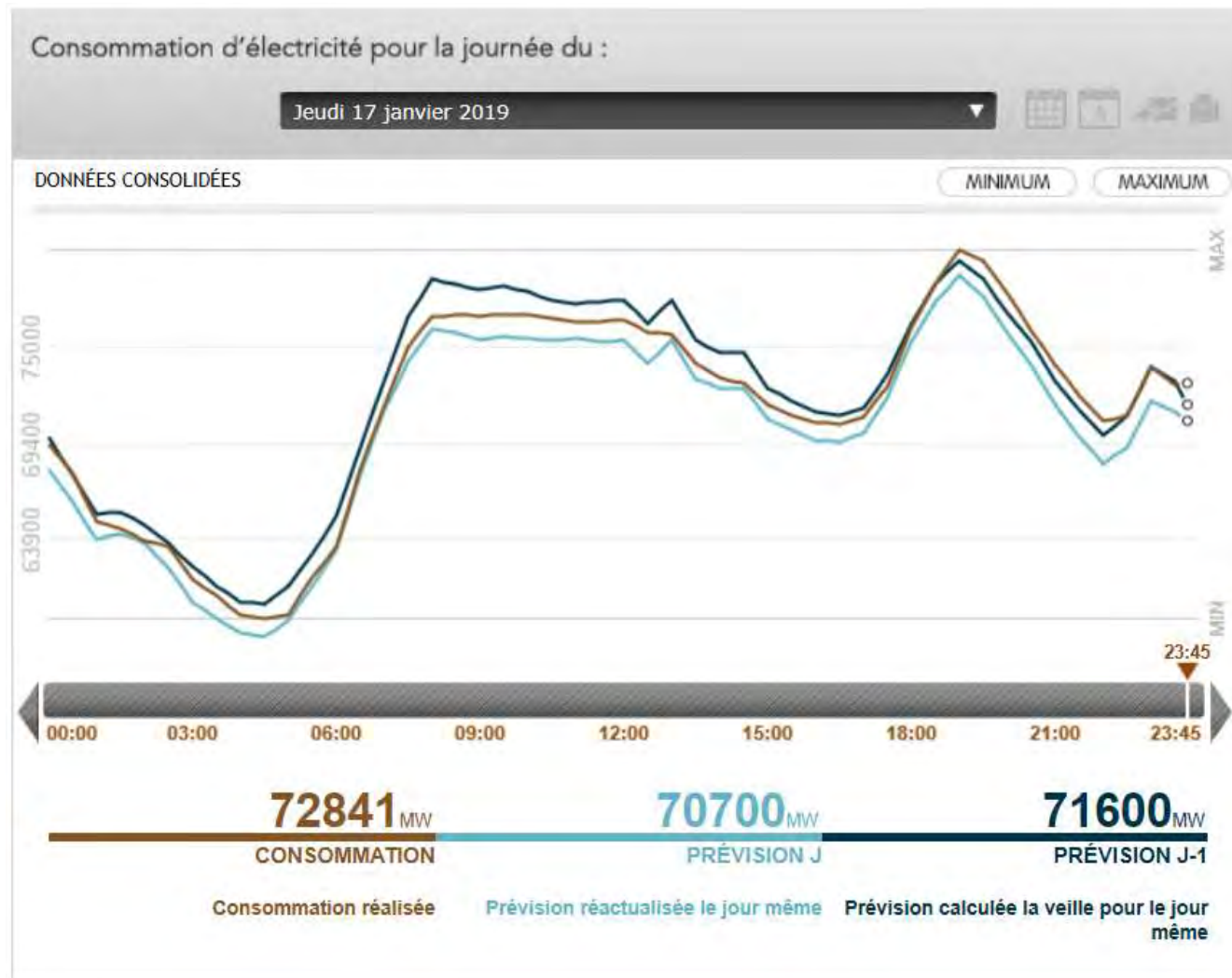


Source RTE

Production = Consommation

Le réseau électrique (2/2)

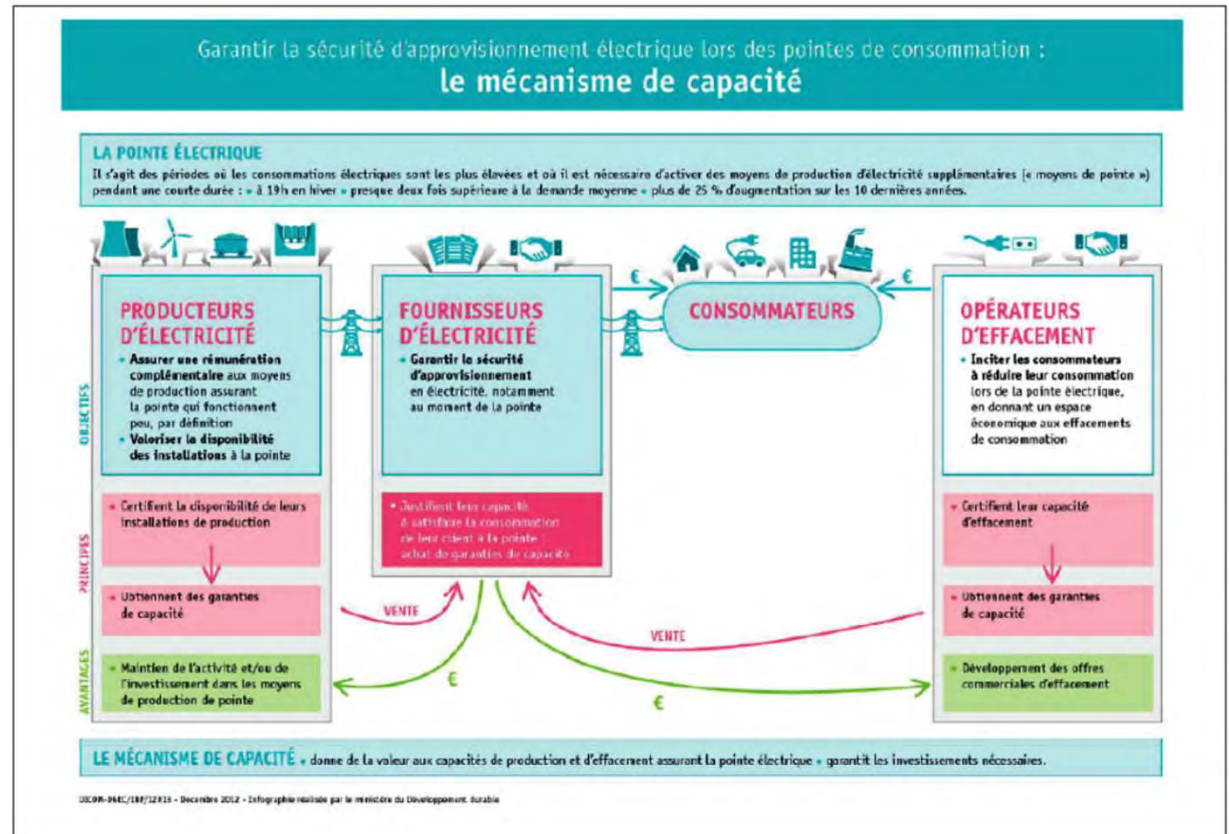
La continuité de la fourniture d'électricité repose sur deux outils complémentaires : le bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande réalisé par le gestionnaire de réseau de transport, RTE, et un marché : le mécanisme de capacité.



Le réseau électrique: Le mécanisme de capacité

Pour assurer les pointes de consommation, on utilise :

- des capacités de production inutilisées habituellement ;
- des interconnexions : il s'agit de liaisons avec les systèmes électriques des pays voisins pour importer leur électricité ;
- des baisses de la consommation d'électricité : les tarifs heures pleines/heures creuses pour les particuliers et/ou des incitations pour les industriels.

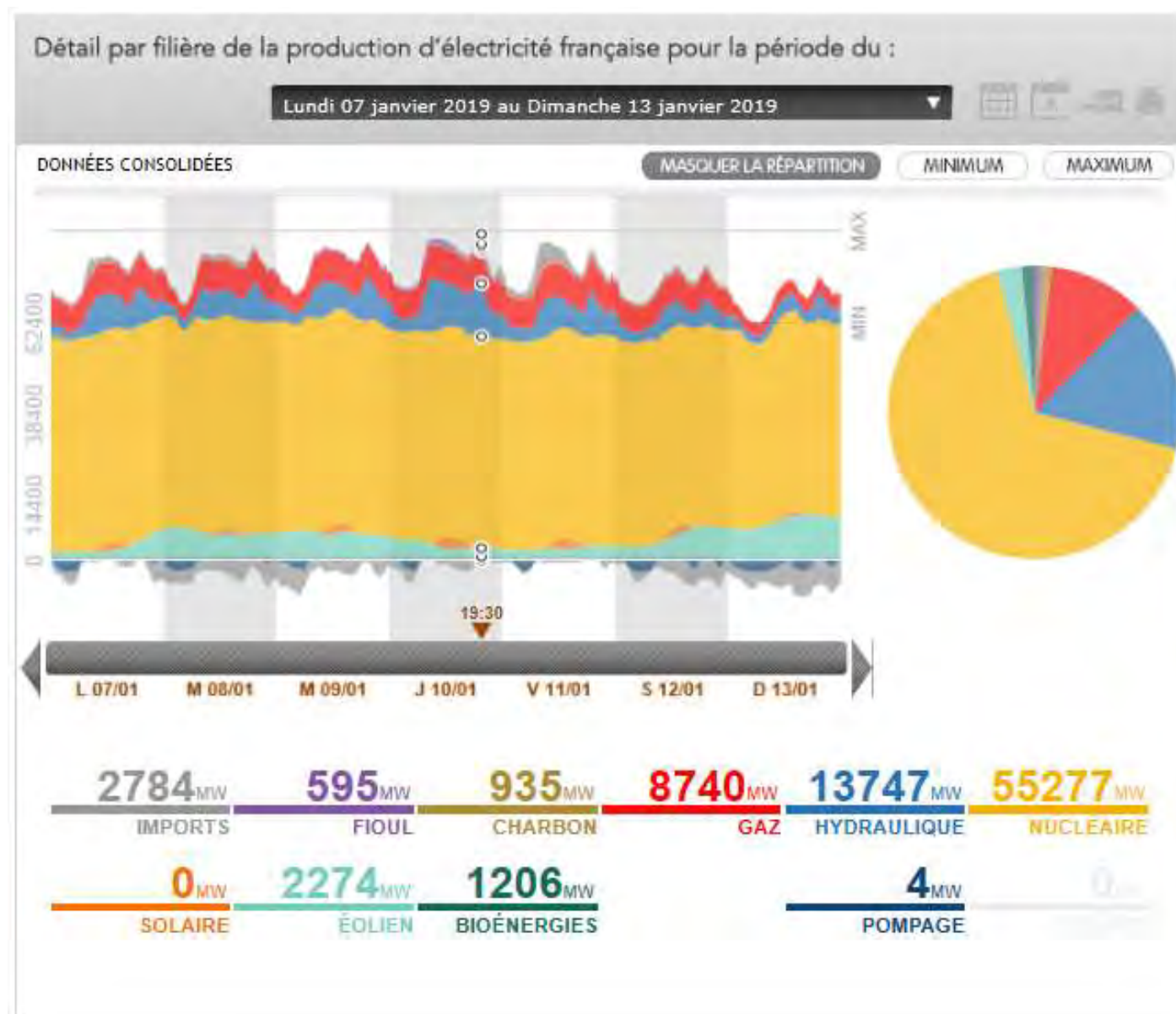


Risque de black-out , intermittence et prix négatifs

Semaine du 7 au 13 janvier 2019

2 phénomènes intéressants :

- 10/01: risque de black-out
- 13/01: vente à prix négatif



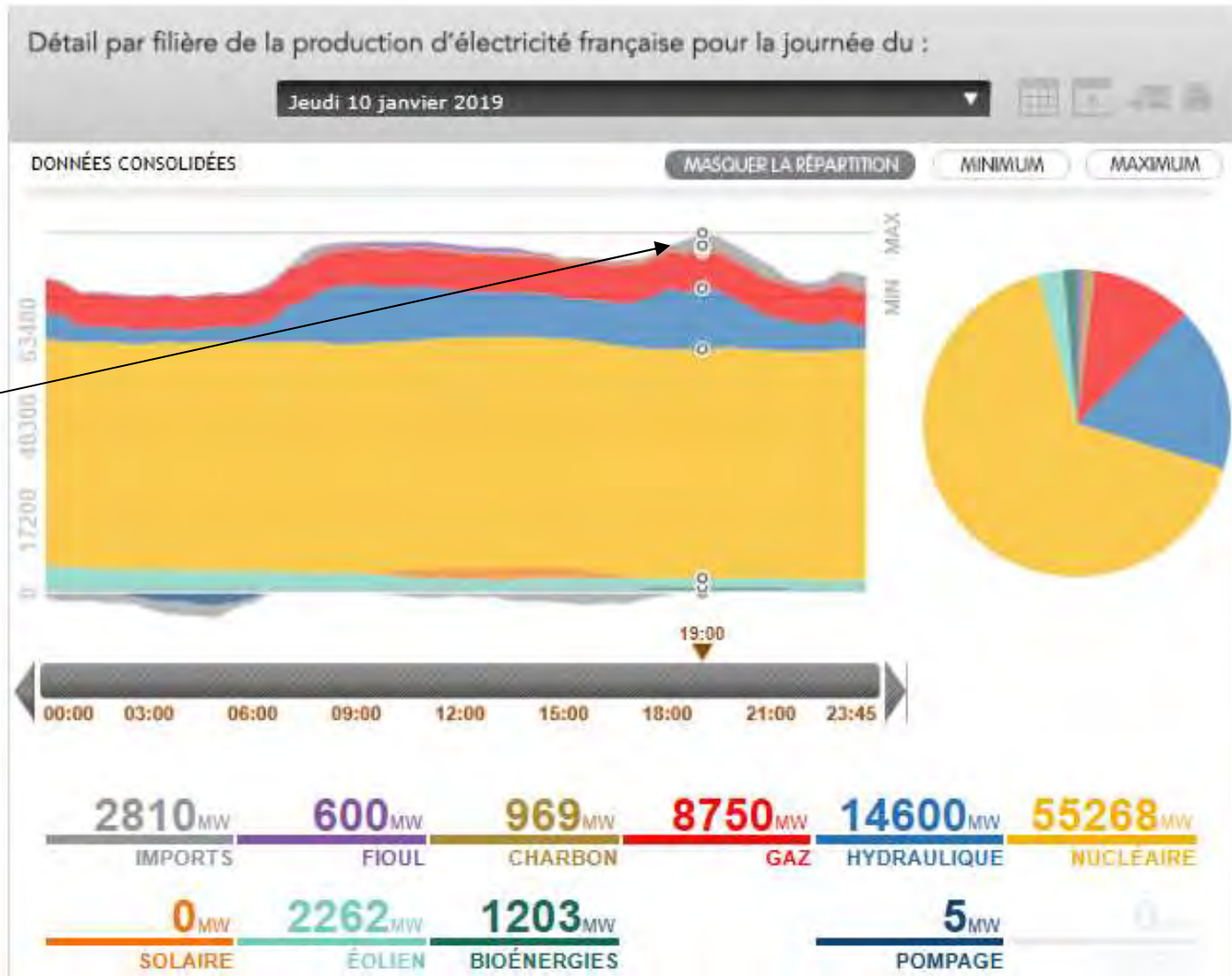
Source: <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix>

Activation du dispositif d'urgence anti black-out – 10 janvier 2019

Zoom sur le 10 janvier 2019

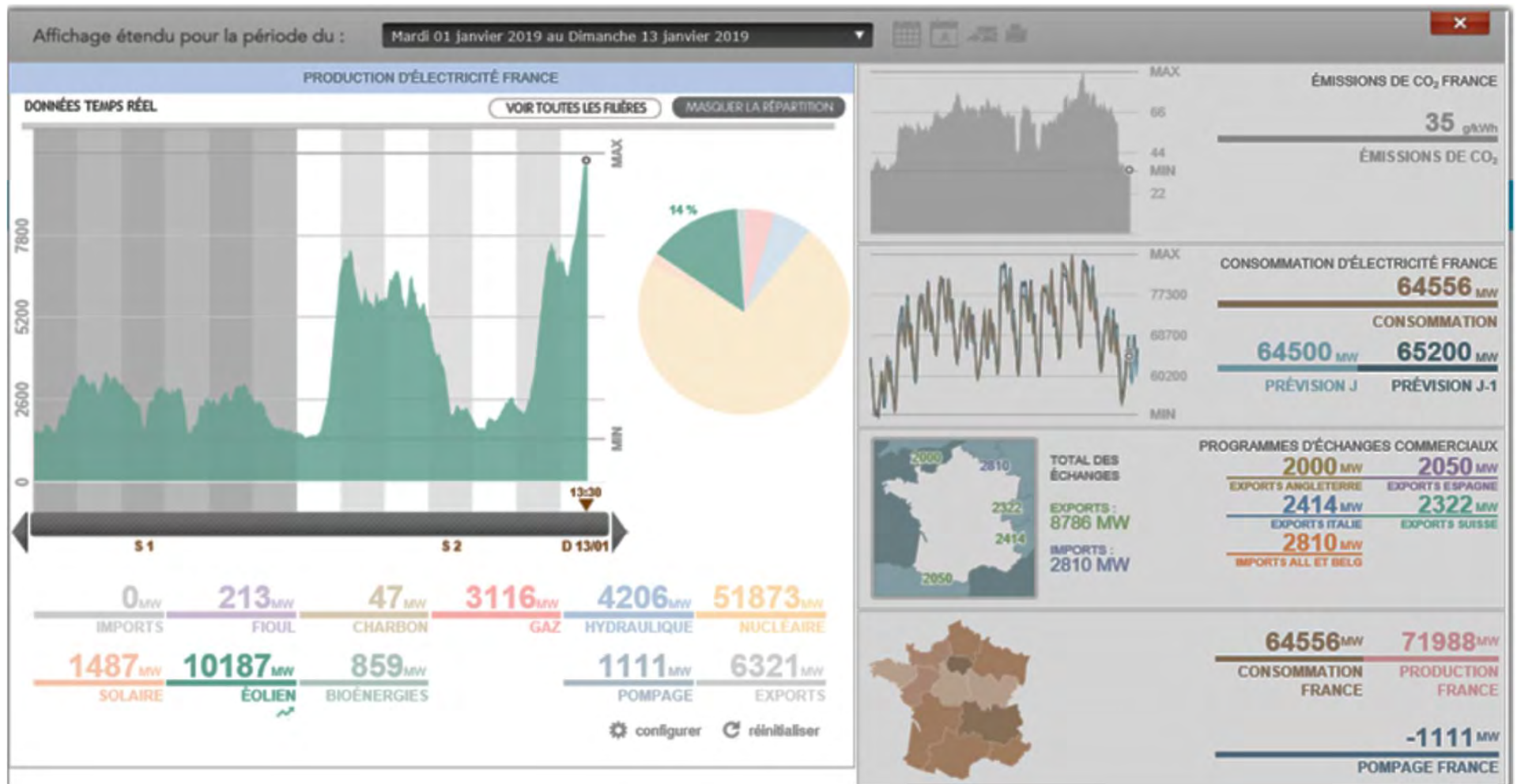
Pic de demande à 19h00

RTE déconnecte une vingtaine de sites industriels



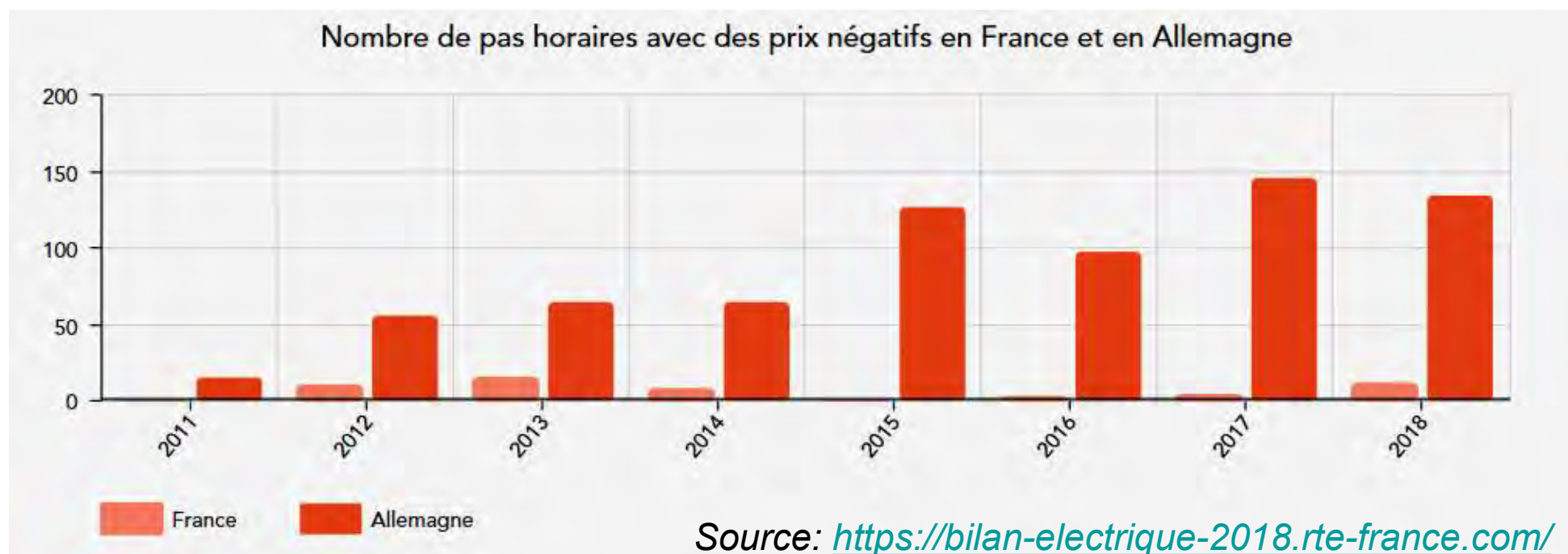
C'était la 2ème fois que le dispositif d'urgence anti black-out était activé depuis sa création dans le cadre de loi NOME de 2011.

Intermittence et prix négatifs – 13 janvier 2019



Les raisons des prix négatifs

Les prix négatifs peuvent survenir lors de creux de consommation (nuit, jour férié, week-end etc.), en raison de capacités de production difficilement modulables ou fatales (éolien, solaire). En effet, il peut être plus coûteux pour un producteur d'arrêter puis de redémarrer une production peu flexible que d'accepter des prix négatifs pendant un certain temps.



On observe principalement des prix négatifs lorsque les productions renouvelables fatales (éolien et solaire) couvrent une part importante de la consommation.

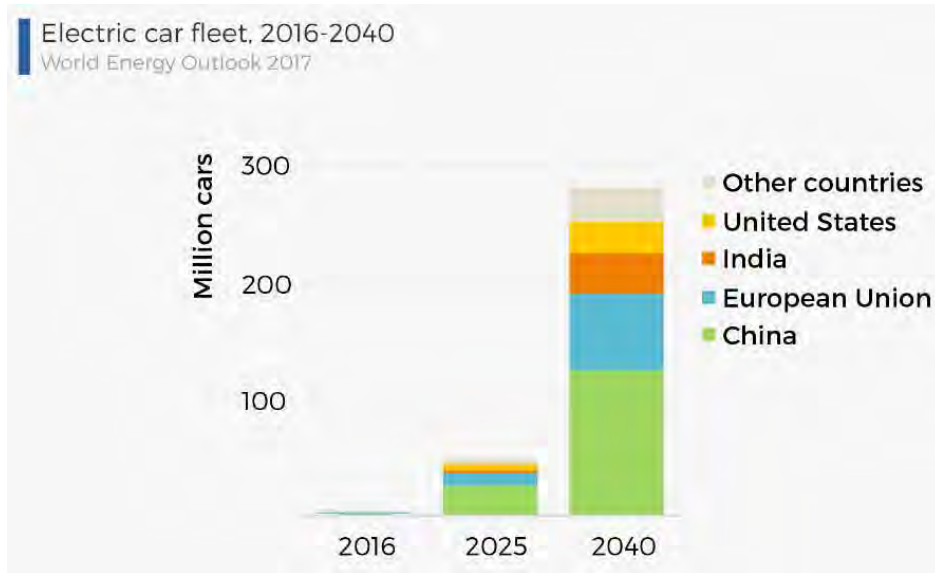
Le stockage de l'électricité, une réalité ?

Le stockage peut être réalisé de 3 manières différentes :

- **un stockage mécanique** : deux retenues d'eau sont nécessaires, l'une plus en altitude que l'autre. Lorsque la consommation est importante, l'eau du bassin en hauteur est libérée pour produire de l'électricité par la force mécanique de la gravité. Lorsque la consommation est plus faible, de l'électricité est utilisée pour faire remonter de l'eau dans le bassin en hauteur.
- **un stockage chimique par piles ou batteries.**
Dans le future, le développement des voitures électriques couplé avec l'intelligence des réseaux pourrait à terme offrir une flexibilité intéressante pour l'équilibre du réseau.
- **un stockage thermique par chaleur (i.e. ballons d'eau chaude).**
- **un stockage sous forme d'hydrogène:** De l'électricité peut être utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. L'hydrogène, stockable, peut ensuite être utilisé comme un vecteur de transformation de l'énergie.

Les transports à moteur électrique

Aujourd'hui: trains, voitures, 2 roues
Demain: bateaux, avion



Septembre 2019: Toyota Prius hybride à panneaux solaires (autonomie solaire: 56 km)

Retour sur la production d'électricité

Bien évidemment, il ne faut pas que le développement du transport électrique se fasse au détriment de la réduction des émissions de gaz à effets de serre.



➔ La production d'électricité doit être d'origine nucléaire, renouvelables ou hydrogène.

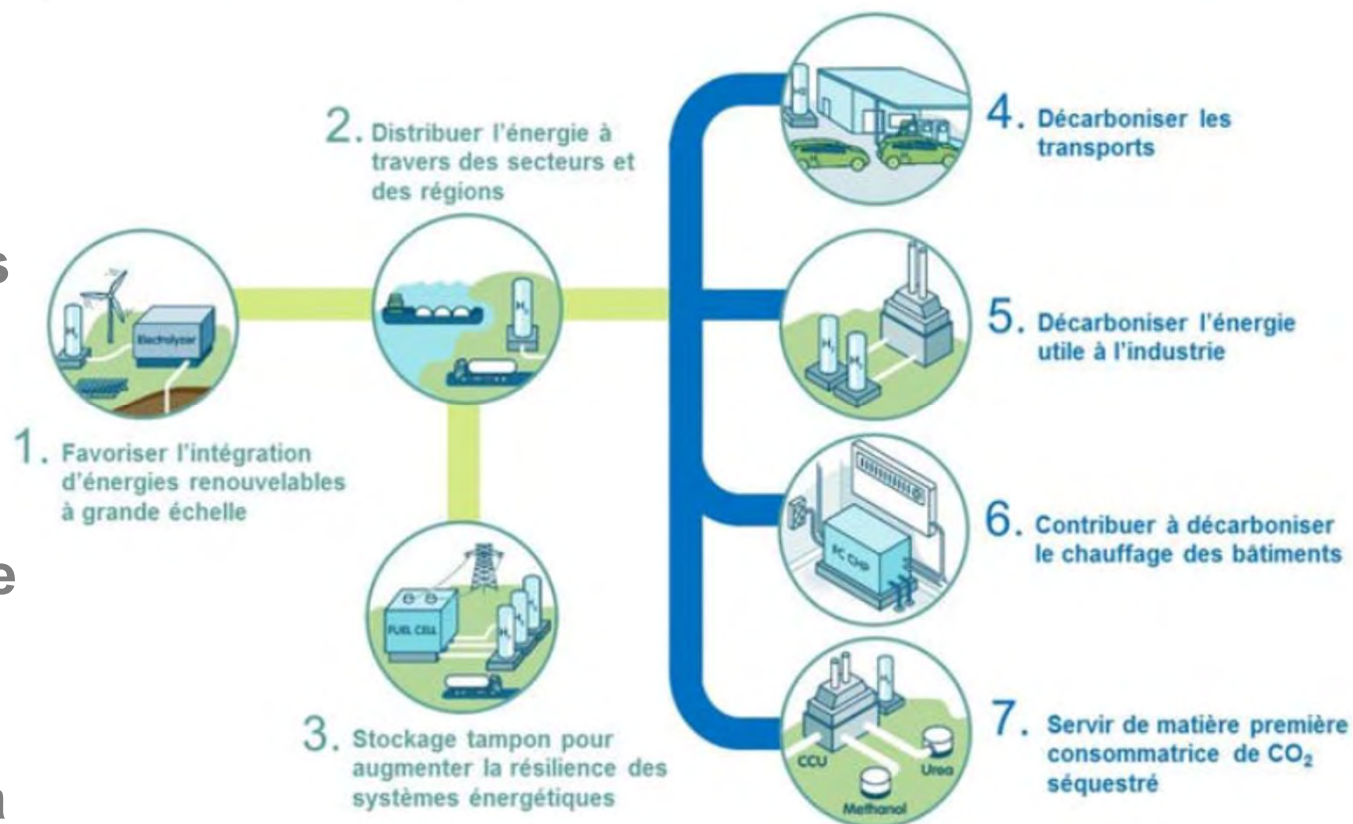
L'Hydrogène



L'économie hydrogène ?

Les enjeux pour le futur (proche ?) s'articulent autour de quatre grands axes :

- Apporter de la flexibilité aux réseaux énergétiques
- Favoriser localement l'autoconsommation des énergies renouvelables
- Apporter des solutions de mobilité propres et flexibles
- Réduire les impacts liés à l'emploi industriel d'hydrogène fossile



L'hydrogène – source ou vecteur d'énergie

L'hydrogène est un gaz combustible léger, inflammable et explosif,

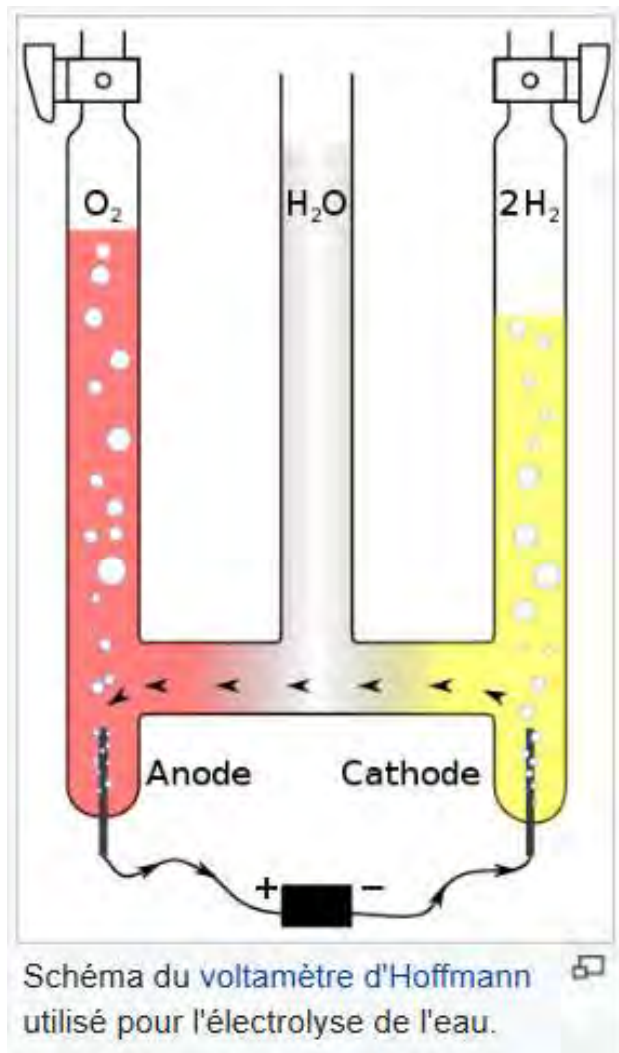
C'est l'élément le plus abondant de l'univers

Il est partout mais présent nulle part sous une forme directement utilisable

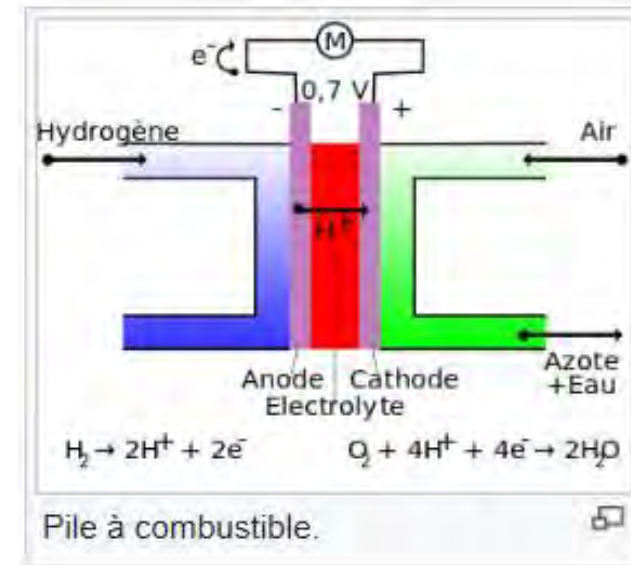
- Il peut être produit à partir de tous les combustibles fossiles, des énergies renouvelables et du nucléaire.
- Il peut être transporté sous forme gazeuse ou liquide et être transformé en électricité ou en méthane pour un large éventail d'usages.
- L'hydrogène est actuellement presque entièrement produit à partir de gaz naturel et de charbon.
- Le coût de production de l'hydrogène à partir d'électricité renouvelable, prohibitif aujourd'hui, pourrait baisser de 30 % d'ici 2030 grâce au déclin des coûts des énergies renouvelables et aux économies d'échelle

L'hydrogène dans le cadre des énergies renouvelables

Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

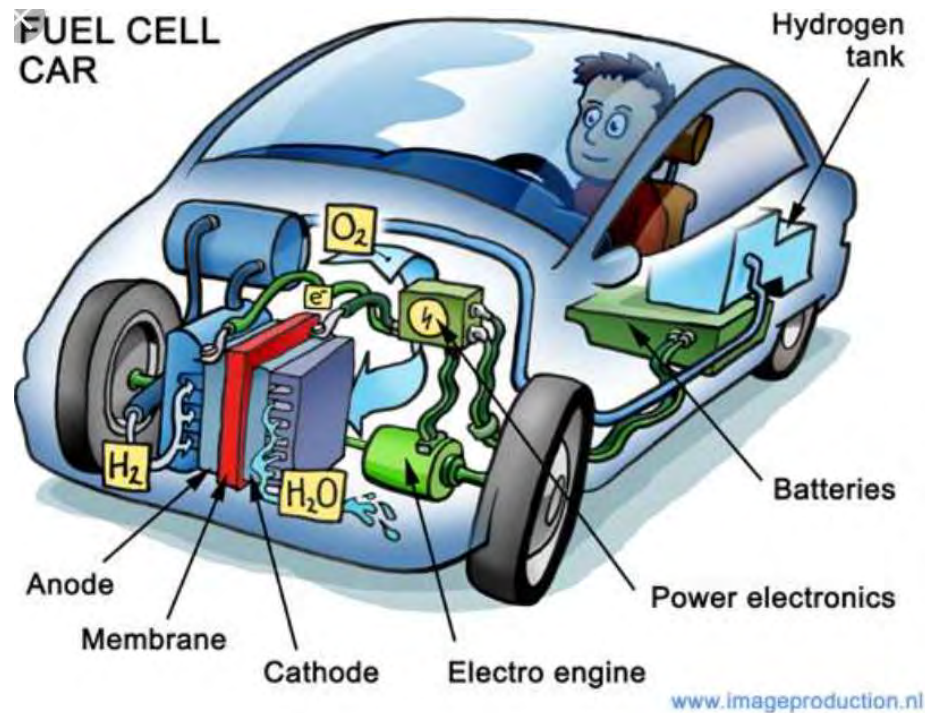


Production d'électricité à partir de l'hydrogène



Une **pile à combustible** est une pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air.

Voiture à hydrogène: avenir ou impasse ?



«Quand on fait les calculs économiques et que l'on regarde la filière hydrogène, on a du mal à se convaincre qu'elle a un horizon à 10 ans. Cela coûte encore très cher. La batterie électrique a aujourd'hui un temps d'avance. Toyota, qui était complètement allé sur l'hydrogène, est d'ailleurs revenu sur l'électrique.»

Patrick Pouyanné, PDG du groupe Total, 2017


Amélioration de l'efficacité énergétique: utopie ou voie à suivre ?

Peut-on réduire la consommation totale dans un pays comme la France ?

➤ chauffage et climatisation:

- isolation optimale de l'habitat : ce sera long... (coût: 600 G€=2 budget état)
- limiter l'utilisation de la climatisation...

➤ équipements:

- lampes basse consommation
- optimisation des appareillages (classe des appareils, non-utilisation de veille des téléviseurs..., extinction des appareils non utilisés)  ne pas gaspiller

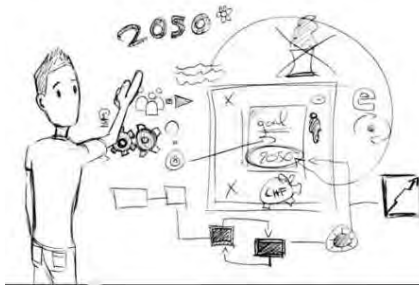
➤ transports:

- privilégier les transports en commun et le ferroutage
- limiter l'utilisation de sa voiture ...
- proximité des lieux de vie et de travail
- ne pas privilégier les vacances lointaines...

Réduire la consommation nécessaire :

- un effort d'isolation exceptionnel
- un changement de mentalité
- un changement dans l'organisation habitat/travail

En conclusion: Quelles énergies pour 2050 ?



Electricity Production

Offer/demand Adaptation

Substitution of fossil fuels and New applications of electricity

