PAREMA

Partenariat énergétique Maroco-Allemand
Deutsch-Marokkanische Energiepartnerschaft

Partenariat Energétique Maroco-Allemand (PAREMA)

Ecole d'été : « Implication de la société civile dans la transition énergétique »

Renforcement des capacités de la société civile marocaine dans le domaine de la politique de l'énergie

16-19 Juillet 2018 / Hotel Terminus / Rabat, Maroc

GERMANWATCH

https://www.facebook.com/SecretariatPAREMA/
https://www.energypartnership.ma/

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

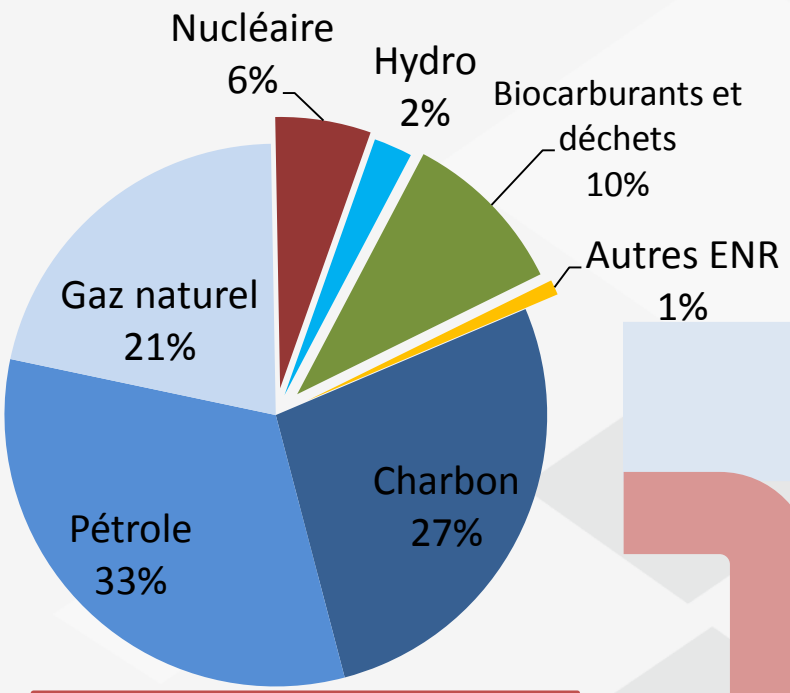
Les technologies énergétiques et les défis de la planification énergétique

Sommaire

1. Les technologies conventionnelles : Gaz, charbon, nucléaire et pétrole
2. Les énergies renouvelables
3. L’intégration des ER au système, réseau et les solutions

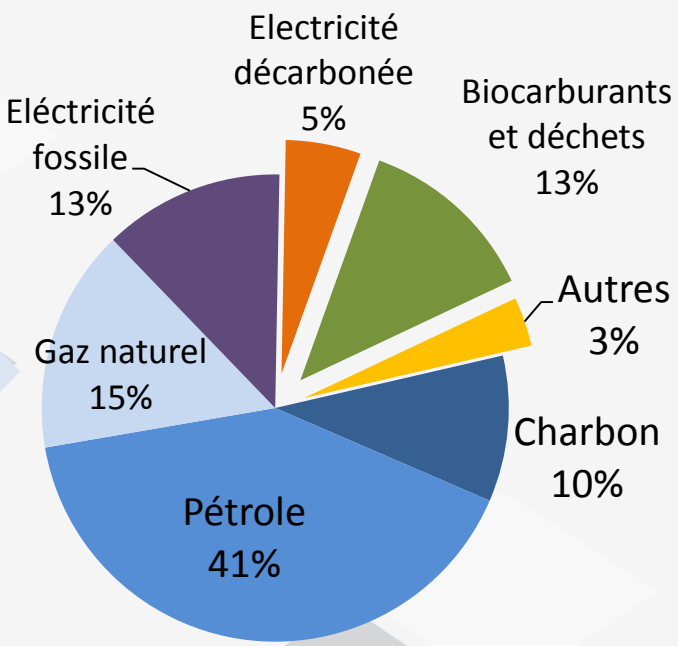
Rappel : l'énergie dans le monde

Consommation mondiale d'énergie primaire (2011)



12720 millions de Tep

Conso. mondiale d'énergie finale



8920 millions de Tep

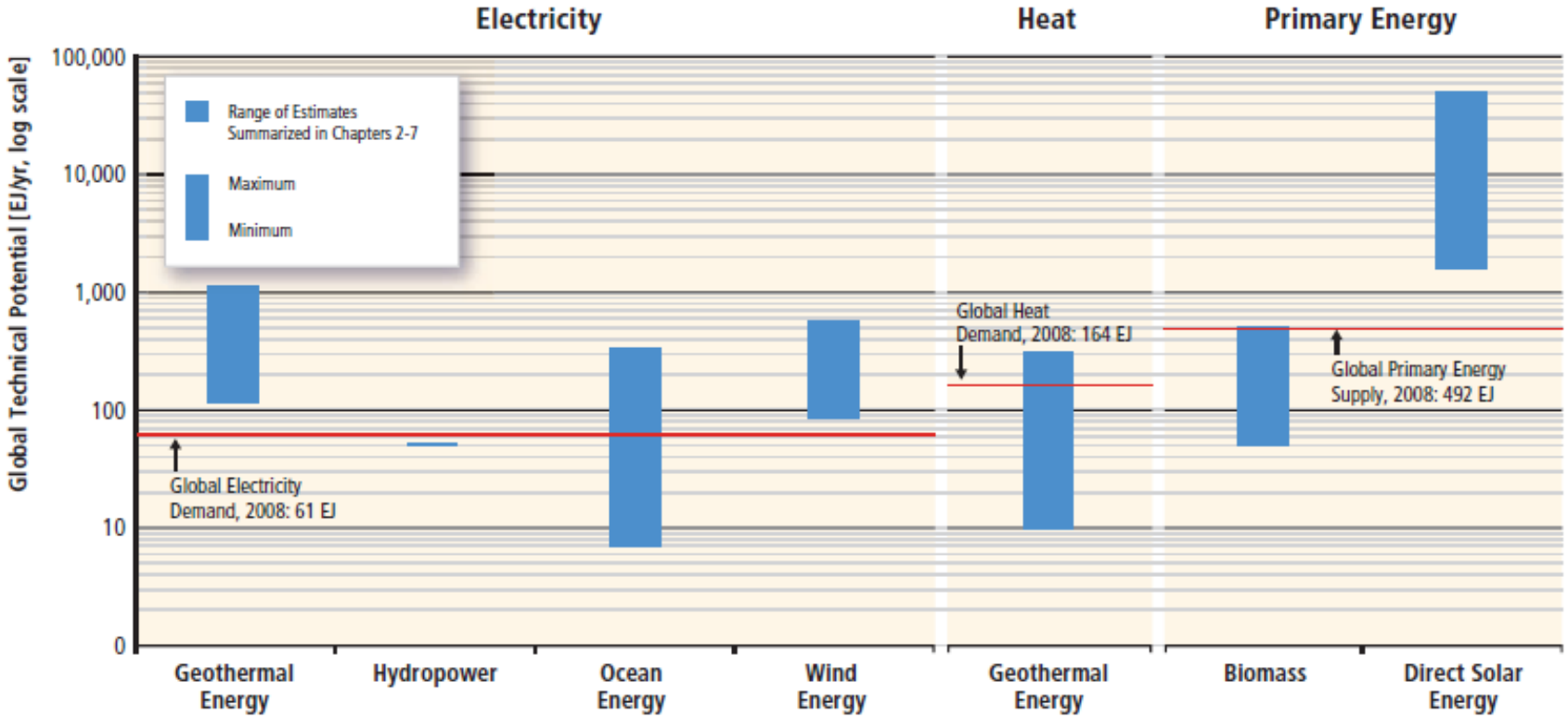
Pertes de transformation

Source: IEA 2013

Tableau comparatif : caractéristiques des principales sources d'énergie dans le monde

Technologie	Potentiel / Réserves	Coût actuel	Intensité carbone	Impact environnemental / ressources	Risques majeurs	Perspectives de développement
Pétrole	(50 ans)	****	****	*****	Tensions géopolitiques Rareté / Prix Emissions	Croissance lente Peu d'alternatives pour les transports
Charbon	(150 ans)	*****	*****	*****	Impact climat Pollution locale (mines)	Stable
Gaz	(50 ans)	***	***	****	Tensions géopolitiques Rareté / Prix Pollution locale	Croissance lente
Eolien	*****	****	*	*	Variabilité Matières premières Coût (risque) Acceptabilité	Croissance rapide
Solaire PV	*****	*****	*	*	Variabilité Coût (risque)	Croissance rapide
Biomasse	****	***	*(**)	**	Durabilité de la ressource Coût Approvisionnement complexe	Croissance moyenne
Géothermie	****	***	*	*	Coût et complexité technique	Croissance lente
Hydro	***	****	*	*(**)	Potentiel déjà exploité dans beaucoup de pays Impact environnemental local	Croissance lente
Nucléaire	***	**	**	**	Risques techniques et acceptabilité Prix croissant	En baisse

Le potentiel technique des ENR dans le monde



Range of Estimates of Global Technical Potentials

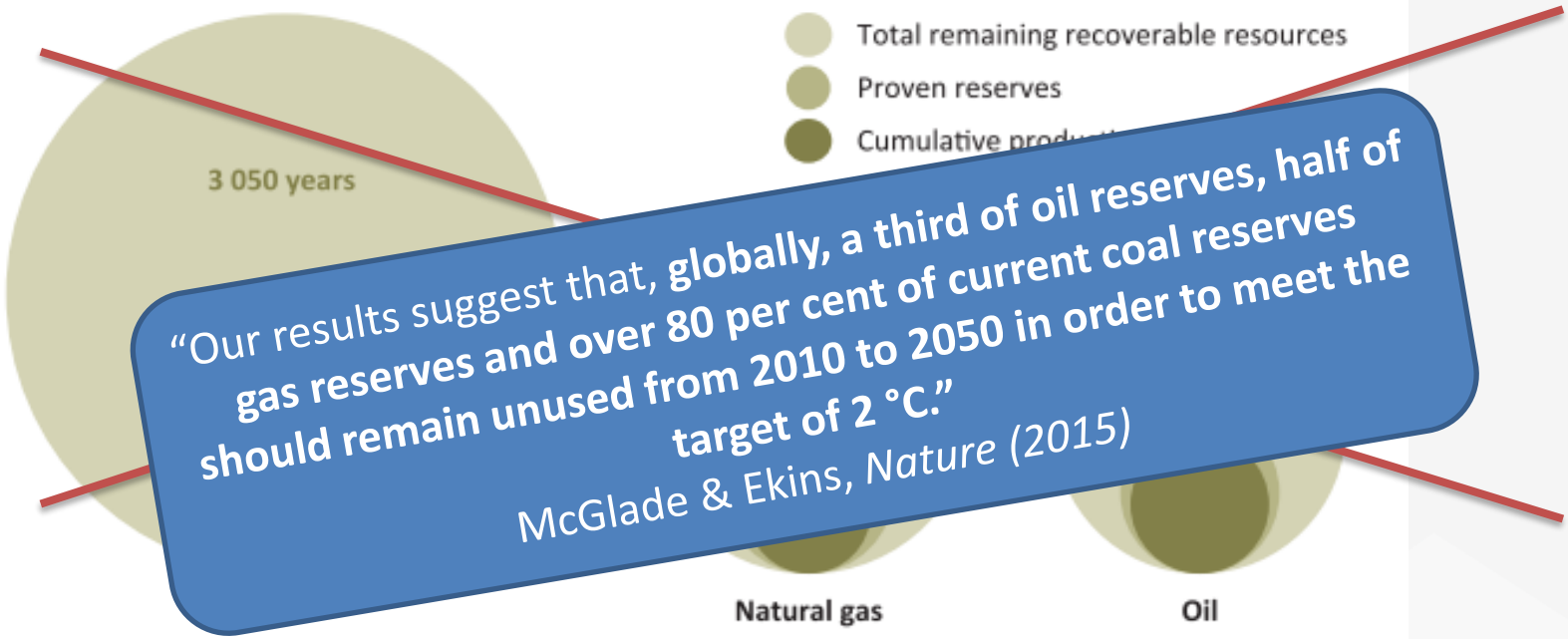
	Geothermal Energy	Hydropower	Ocean Energy	Wind Energy	Geothermal Energy	Biomass	Direct Solar Energy
Max (in EJ/yr)	1109	52	331	580	312	500	49837
Min (in EJ/yr)	118	50	7	85	10	50	1575

Figure SPM.4 | Ranges of global technical potentials of RE sources derived from studies presented in Chapters 2 through 7. Biomass and solar are shown as primary energy due to their multiple uses; note that the figure is presented in logarithmic scale due to the wide range of assessed data. [Figure 1.17, 1.2.3]

IPCC 2011

Après le peak oil, le « climate peak » ?

Figure 2.10 ▷ Fossil energy resources by type



"Our results suggest that, **globally, a third of oil reserves, half of gas reserves and over 80 per cent of current coal reserves should remain unused from 2010 to 2050 in order to meet the target of 2 °C.**"
McGlade & Ekins, *Nature* (2015)

Notes: All bubbles are expressed as a number of years of production based on estimated production in 2013. The size of the bubble for total remaining recoverable resources of coal is illustrative and is not proportional to the others. The figure specifies the status of reserves for coal as of end-2011, and gas and oil as of end-2012. Sources: BGR (2012); O&GJ (2012); USGS (2000, 2012a and 2012b); IEA estimates and analysis.

IEA : World Energy Outlook 2013

Les énergies fossiles, sujet tabou dans les négociations internationales ?

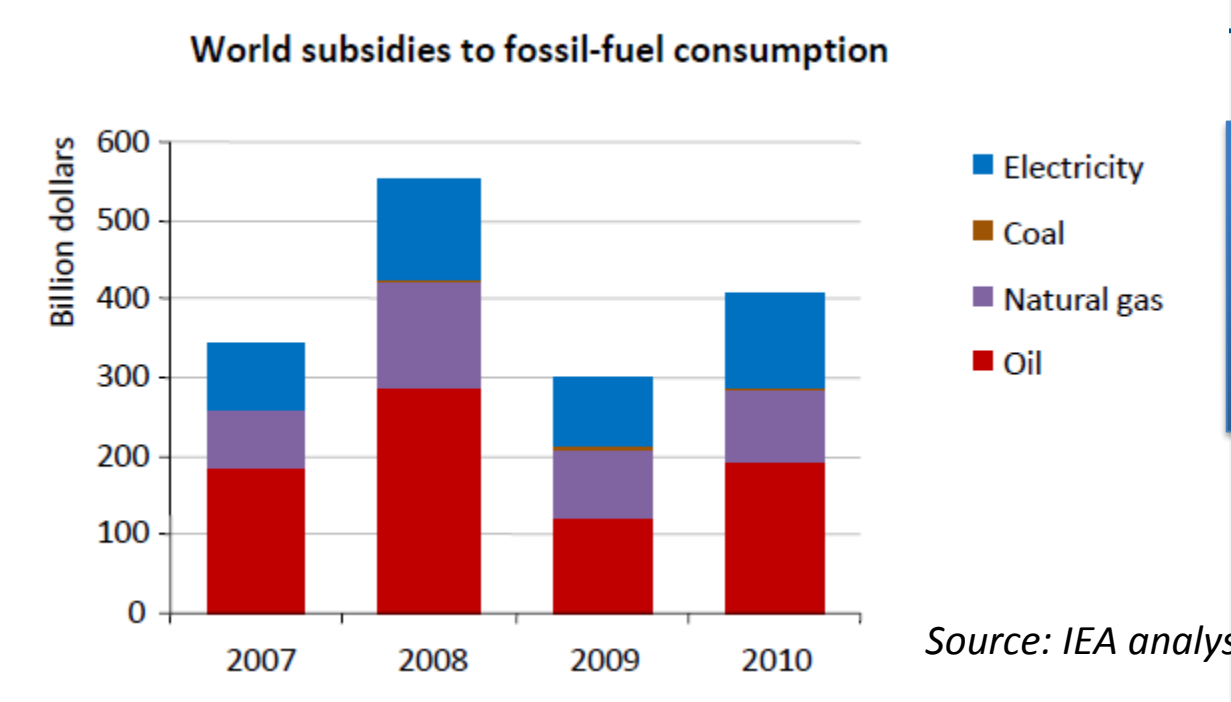
Décompte des mentions de différents mots dans les différents textes internationaux :

	Energy	Fossil	Renewable(s)	Emission(s)
Convention climat	6	4	0	23
Protocole de Kyoto	7	0	1	57
Brouillon de Genève	7	2	1	215
Accord de Paris	3	0	1	48

➔ La question climatique relève à 70 % de nos consommations d'énergies fossiles… mais les accords internationaux ne parlent quasiment pas des questions énergétiques.

➔ Position des pays producteurs : « il ne s'agit pas d'un traité sur l'énergie » ➔ *omettre toute référence au poids des fossiles, toute taxe, etc.*

L'enjeu de la taxation du carbone



Source: IEA analysis of fossil-fuel subsidies 2011

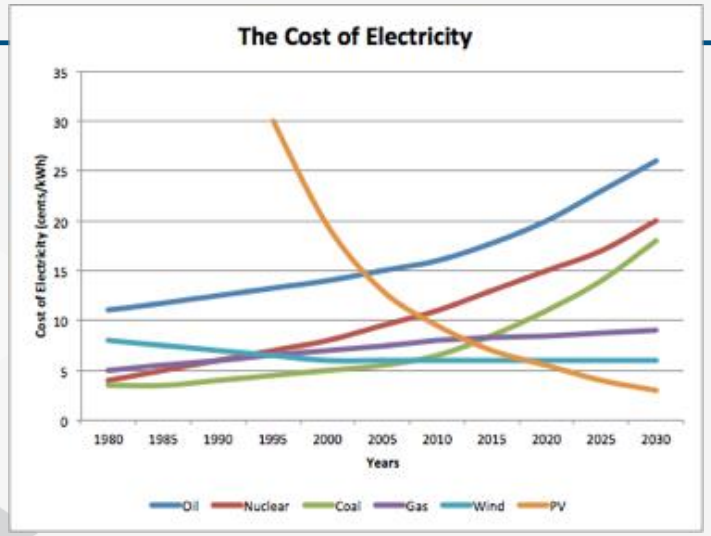
Subventions fossiles 2012:
544 Mrd. $

Subventions ENR 2012:
101 Mrd. $

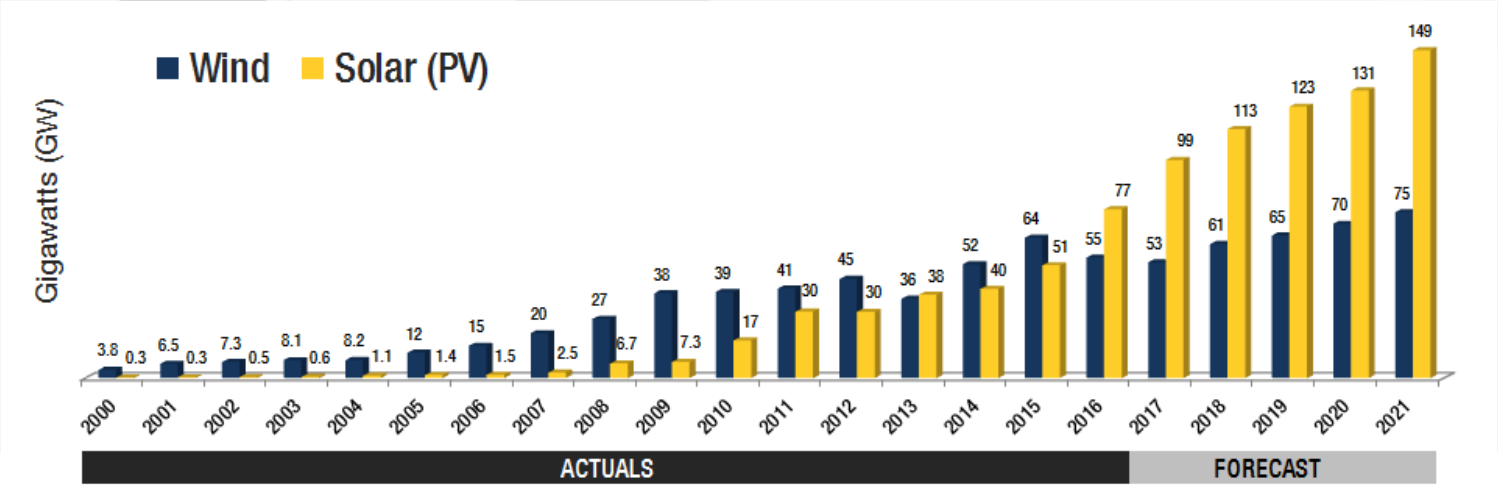
- Seulement 8% des subventions pour les énergies fossiles bénéficient aux 20% les plus pauvres
- **Coût implicite des aides: -18 $ / T. CO_2**
- **Evolution probable: 660 Mrd. $ de subventions en 2020** (énergies fossiles)
- Prix carbone nécessaire pour faciliter la transition sans mécanismes de soutien directs: 30 à 100 € / T. CO2, jusqu'à 200 $ /T. CO2 d'ici 2030 ?

L'essor des énergies renouvelables

- Boom des ENR et baisse des coûts : une décarbonisation drivé par les forces du marché ?
- Mais une dynamique insuffisante en l'absence de politiques fortes de maîtrise des consommations



Nouvelles capacités éoliennes et solaire PV installées par an dans le monde



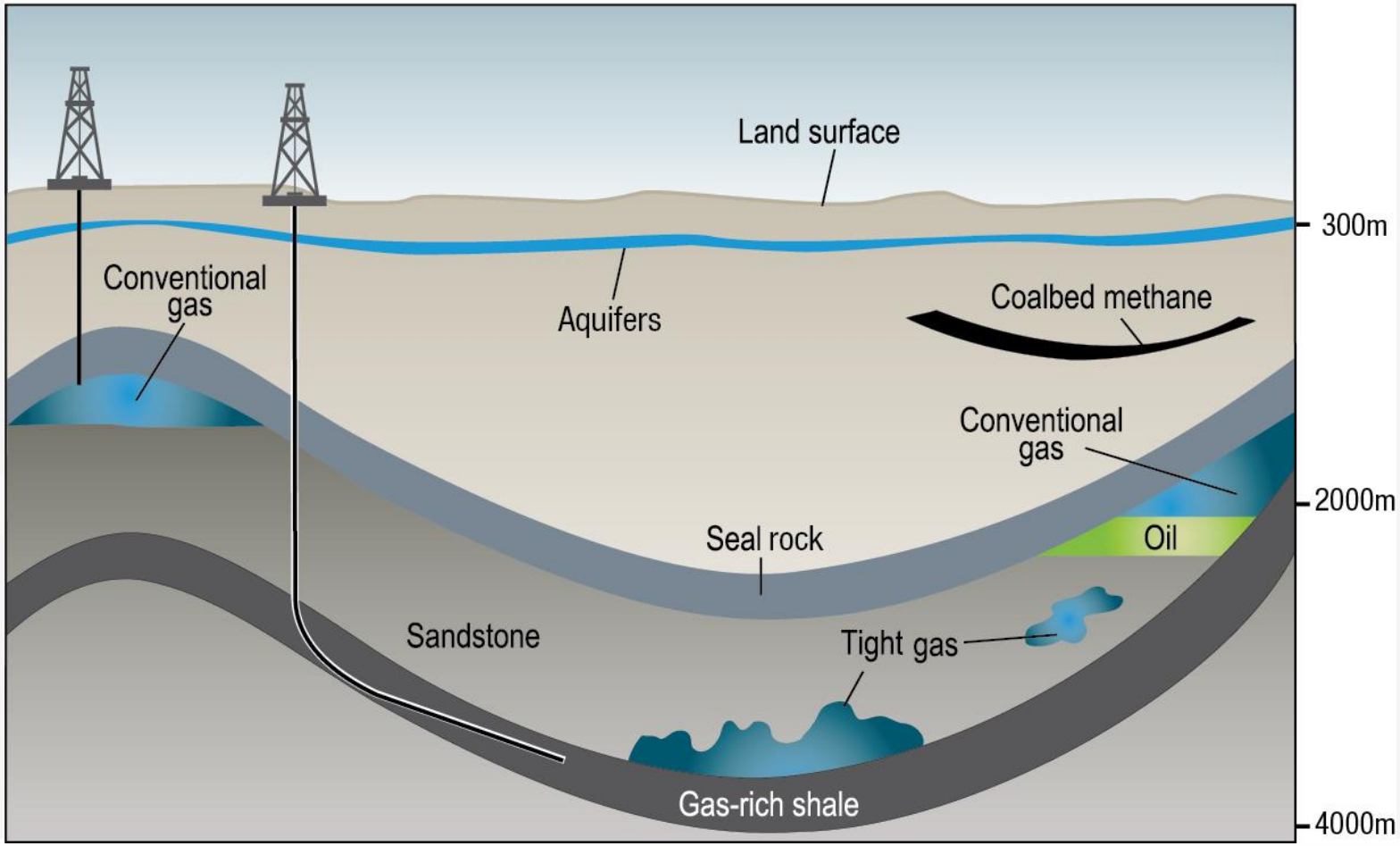
1. Les technologies conventionnelles

- Gaz naturel
- Pétrole
- Charbon

Energies fossiles provenant des plantes, animaux et micro-organismes ayant vécu il a des millions d'années (soumises a de fortes pressions et hautes températures)

- Energie nucléaire

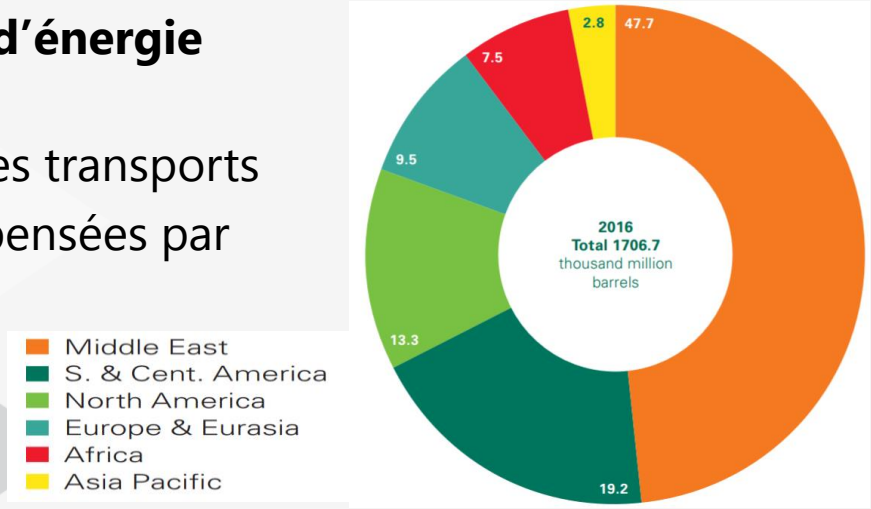
Géologie des ressources fossiles



Source: Canadian Association of Petroleum Producers

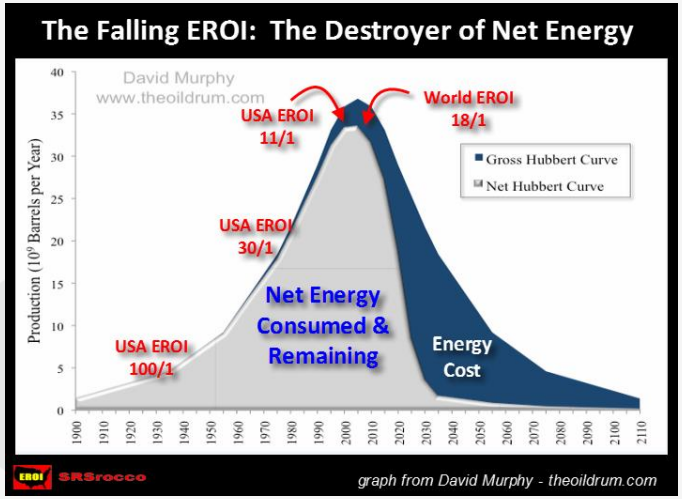
Le pétrole

- **33 % de la consommation mondiale d'énergie primaire**
- 96 % des consommations du secteur des transports
- découverte de nouvelles réserves compensées par hausse de la demande

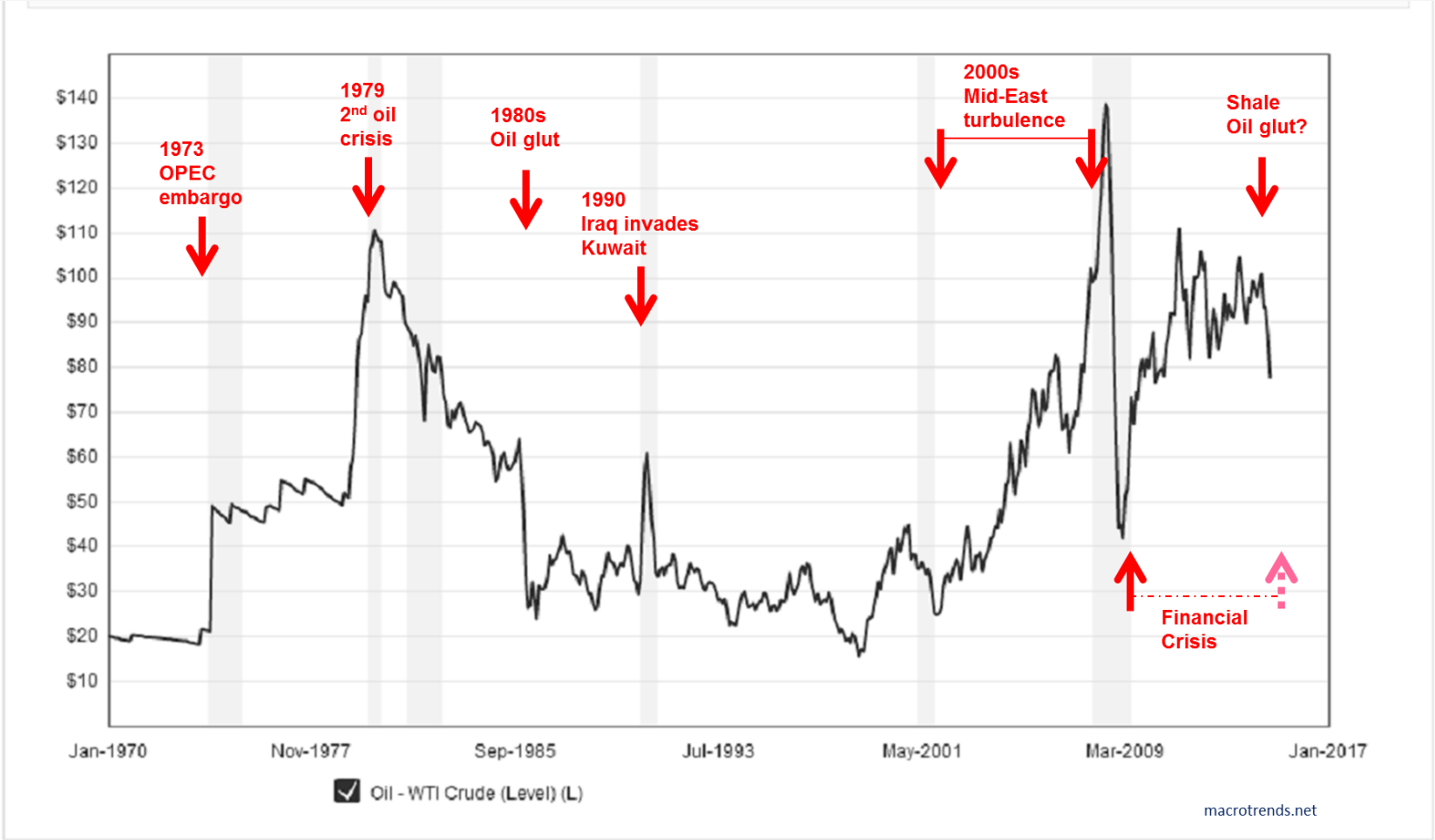


- **Géopolitique** du pétrole et fluctuation des prix

- Le **taux de retour énergétique :**
  - 1:100 au début du 20e siècle
  - 1:30 dans les années 1970
  - Actuellement : entre 1:1 et 1:8



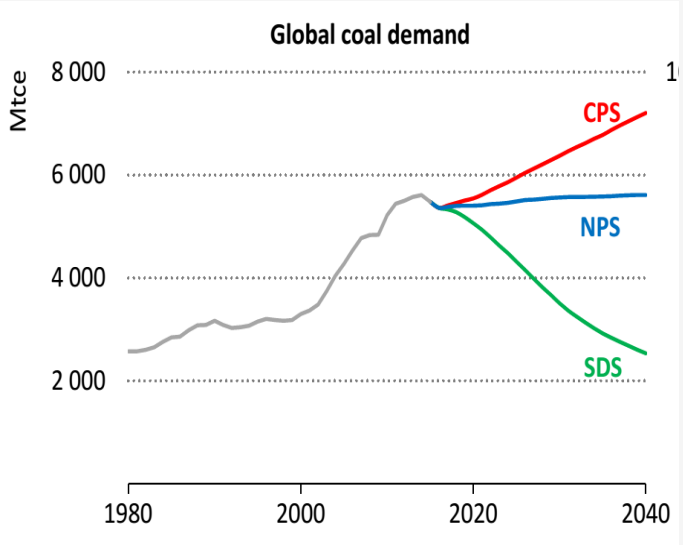
Le pétrole depuis les années 70: une histoire chaotique

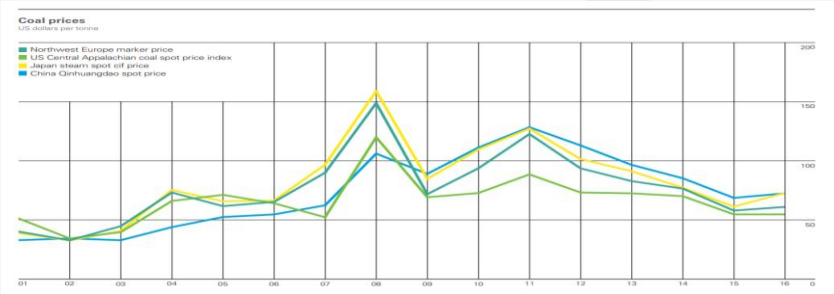


Crude Oil Price History Chart

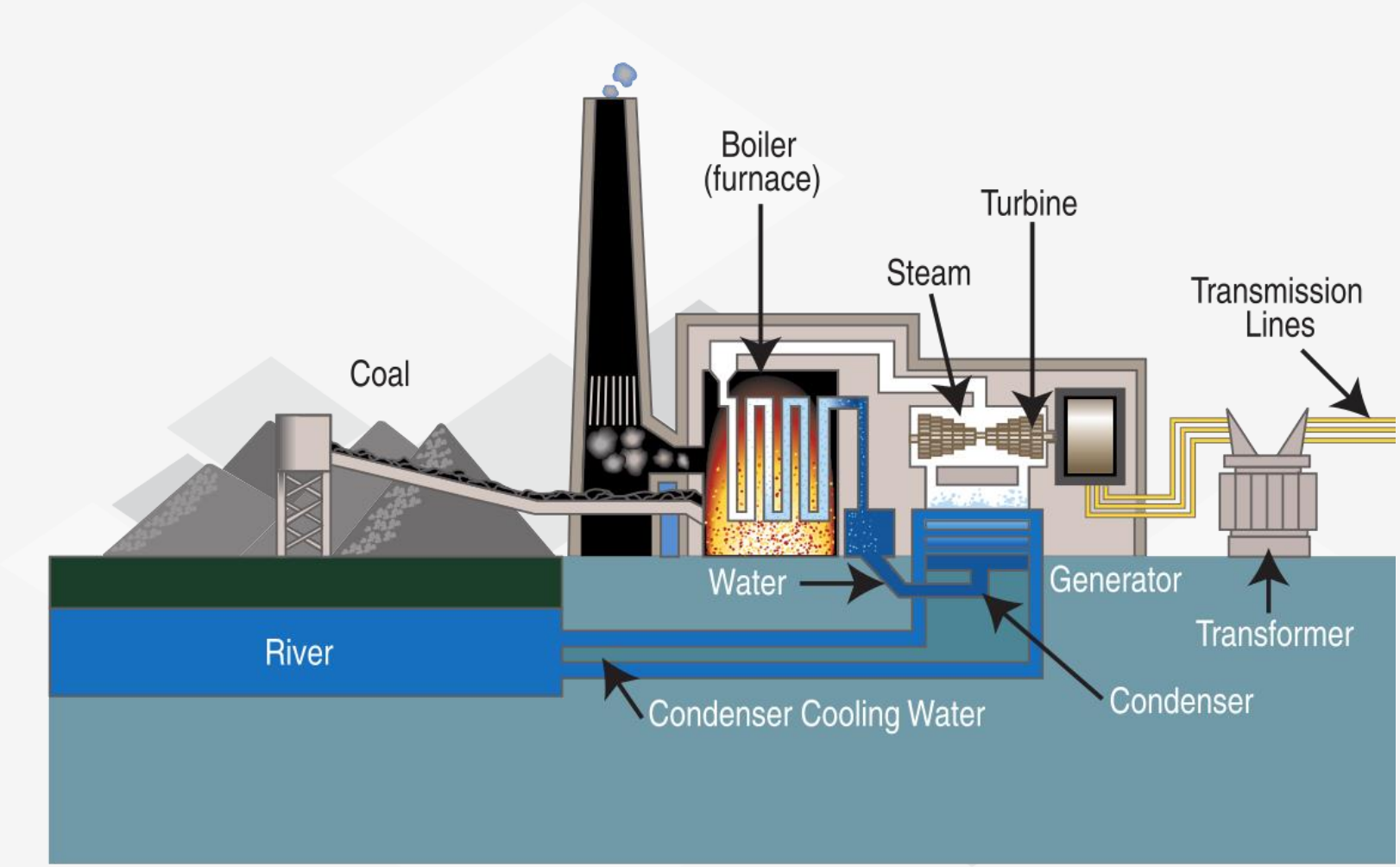
Le charbon

- **ressource abondante** (150 ans à consommation constante) et relativement peu chère
- **intensité carbone** très élevée : 800-1200 gCO2/kWh ➔ 46 % des émissions de CO2 dues à l'énergie
- **pollution locale** : mines et polluants atmosphériques
- prix lié au marché international (Chine) et assez fluctuant



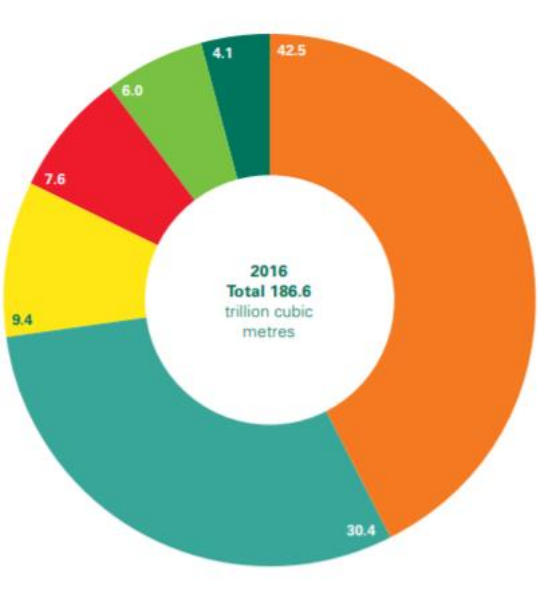


Le charbon – modèle d'une centrale



Le gaz naturel

- 20 % de la consommation d'énergie mondiale
- intensité carbone meilleure que le charbon et le pétrole (400 à 800 gCO2/kWh)
- Facile à stocker et à transporter
- 50 ans de réserves à consommation stable



- Les fuites de gaz et le débat sur le PRG du méthane

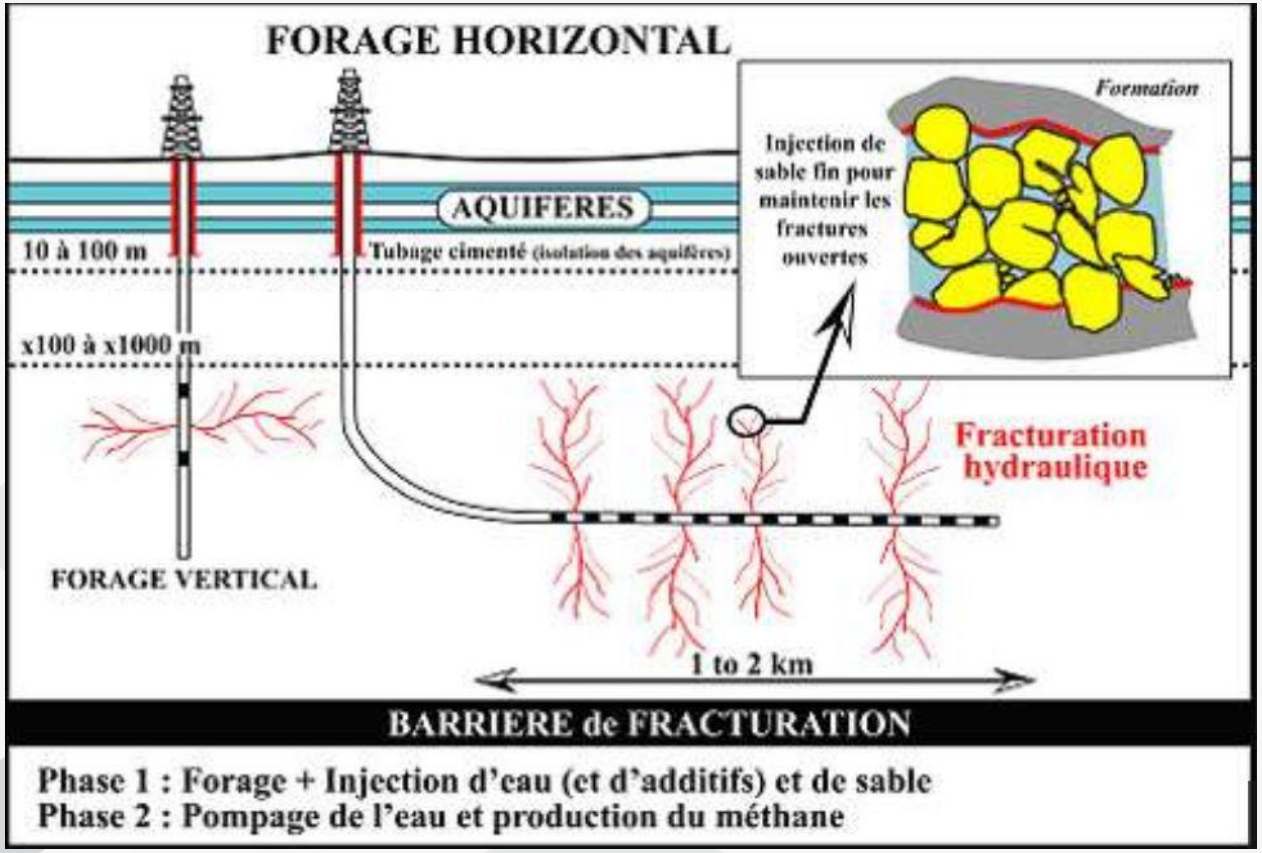
- La perspective de la transition énergétique : **distinguer entre le <u>vecteur gaz</u>** (potentiellement renouvelable) **et le gaz naturel comme source d'énergie (fossile)**

- **Alternatives renouvelables :** méthanisation (biomasse), méthanation (Power-to-gas)

Le gaz naturel – la question du forage

Le gaz est souvent extrait de manière verticale, à l'aide d'un forage (fracking: facturation hydraulique)

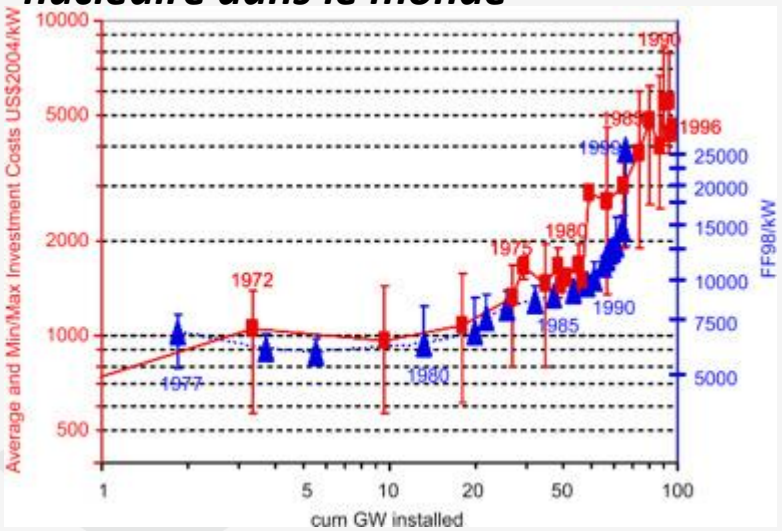
Question de l'impact sur l'environnement!



Le nucléaire

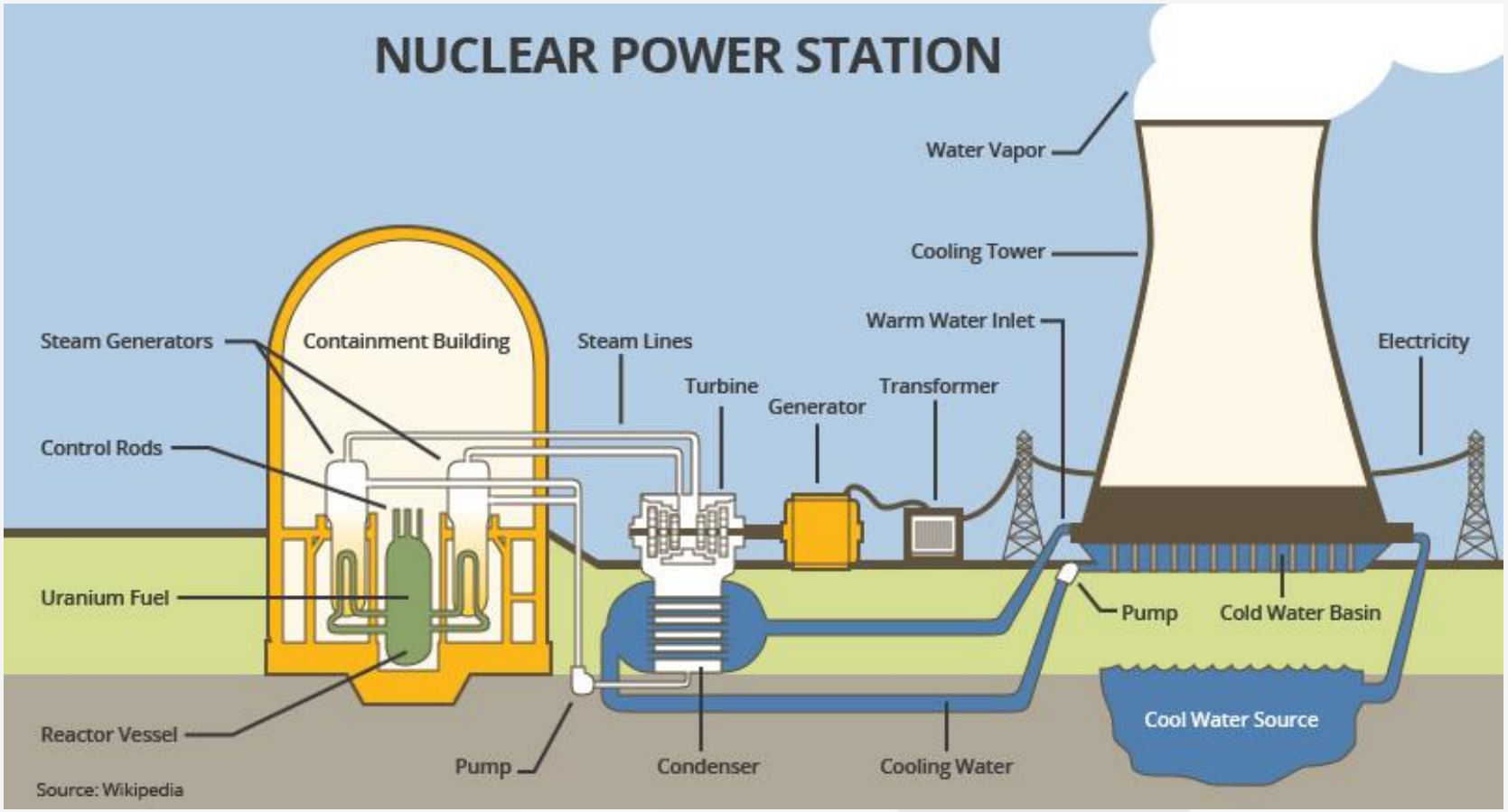
- 10 % de la production d'électricité mondiale (2 % de la consommation finale d'énergie)
- Production en baisse depuis 2006
- Un **parc vieillissant :** 30 ans en moyenne
- Délais de construction croissants
- Intensité carbone (ACV) : 66gCO2/kWh
- Coût : 110€/MWh pour les derniers projets en Europe (EPR) ;
- Enjeu politique : quelle acceptabilité des risques ?
- Gestion des déchets et démantèlement : des solutions à définir.

Evolution des coûts d'installation du nucléaire dans le monde



Source: Grubler 2010

L'énergie nucléaire



https://www.newlook.dteenergy.com/wps/wcm/connect/dte-web/home/community-and-news/common/kc/nuclear-energy

2. Les énergies renouvelables

IPCC:

- "*L'énergie renouvelable est toute forme d'énergie solaire, géophysique ou biologique qui est reconstituée par des processus naturels à un taux égal ou supérieur à son taux d'utilisation.*" (IPCC, 2012:178)

IEA:

- "*L'énergie renouvelable est dérivée de processus naturels qui se renouvellent en permanence. Sous ses diverses formes, elle dérive directement du soleil, ou de la chaleur générée dans les profondeurs de la terre. La définition inclut l'électricité et la chaleur produites à partir de l'énergie solaire, éolienne, océanique, hydroélectrique, de la biomasse, des ressources géothermiques, des biocarburants et de l'hydrogène provenant de ressources renouvelables.*" (IEA, 2002:9)

2. Les énergies renouvelables

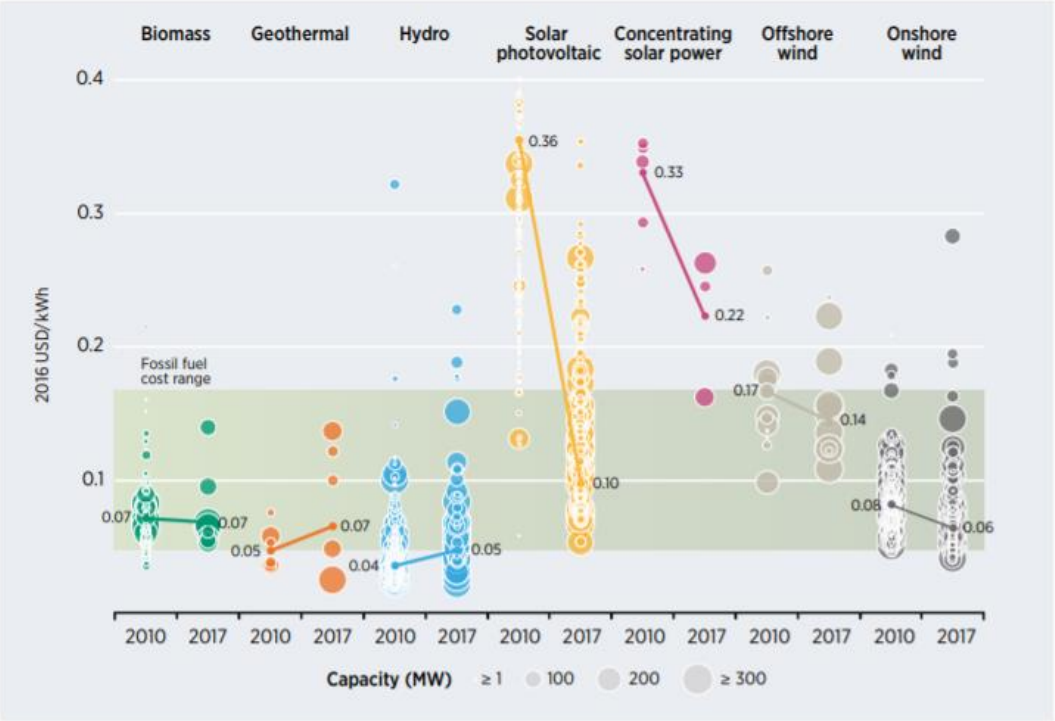
Types d'ER utilisés pour produire de l'électricité :

- Solaire : Photovoltaïque (PV), énergie solaire à concentration (CSP Concentrating Solar Power)
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydroélectrique
- Énergie géothermique
- Bioénergie

Les renouvelables – la baisse des coûts

- Baisse rapide des coûts d'installation
- Solaire : -73 % depuis 2010
- Records: 3 cts/kWh pour l'éolien
- <3 cents/kWh pour le PV
- **Compétitivité** avec les sources fossiles

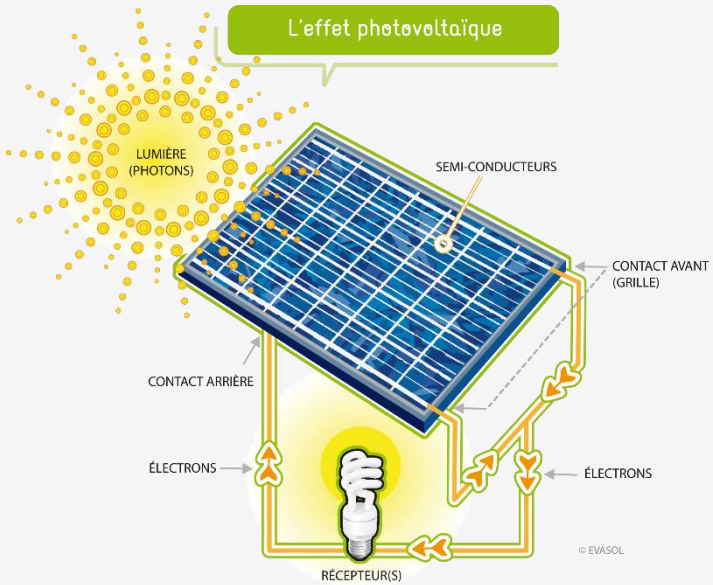
Figure ES.1 Global levelised cost of electricity from utility-scale renewable power generation technologies, 2010-2017

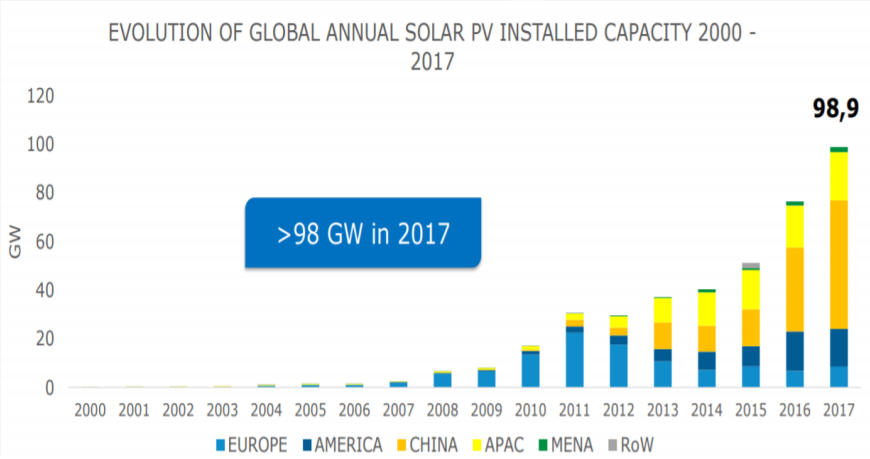


Source: IRENA Renewable Cost Database.

Le solaire photovoltaïque

- 40 % des capacités électriques installées en 2017
- Coût : 100$/MWh en moyenne, jusqu'à 25$/MWh pour les meilleurs sites !
- Variabilité : un facteur de charge de 10 à 20 % selon les sites
- Différentes technologies : cristallin (90 % du marché), couches minces <10 %), hybrides, organiques…
- **Impact environnemental** dépend du pays de fabrication et du pays d'installation (effet de substitution)
- **Modularité** et souplesse pour de nombreuses applications (centrale au sol, en toiture, etc.)





L’énergie photovoltaïque

Conception modulaire : systèmes de toiture à grande échelle sur les bâtiments (env. 1 MW

Conception modulaire : systèmes PV résidentiels installés sur le toit (20 kW)

Conception modulaire : systèmes PV à l'échelle utilitaire (> 1 MW à plus de 500 MW), en réseau et hors réseau.

REN21, 2016, p89 & 95

Les centrales solaires à concentration (CSP)

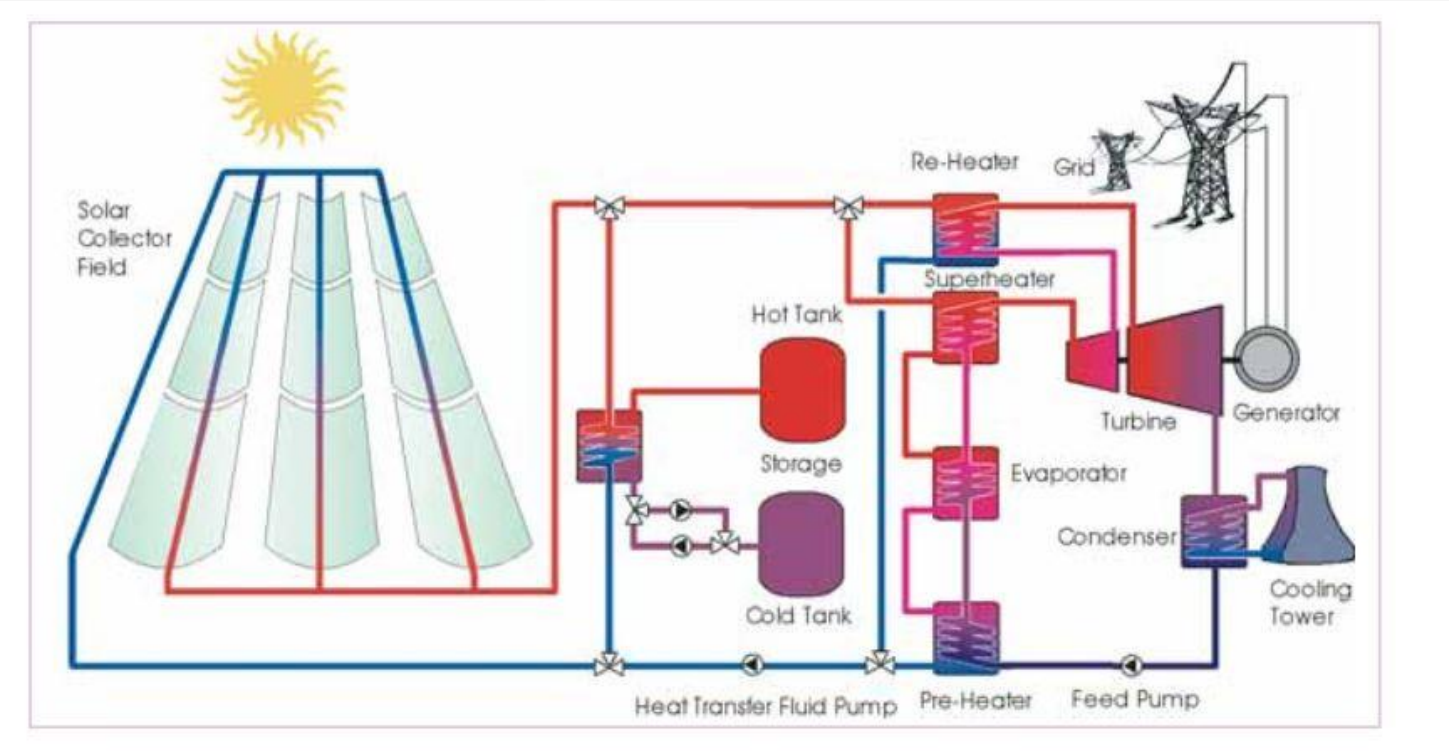
- Technologie basée sur la chaleur
- Développement faible (5 GW en 10 ans) et maturité très inférieure au solaire PV

- **Avantage majeur : stockage thermique ➔ jusqu'à 70 % en facteur de charge (!)**
- **Réduction des coûts :** projets à 73$/MWh (Dubai 2017), 60$/MWh (Australie)

- Technologie compétitive d'ici 2025-2030
- Limites :
  - coût
  - consommation en eau (nettoyage miroirs, refroidissement) et surfaces
  - technologie centralisée

Coût de production CSP (IRENA 2018)

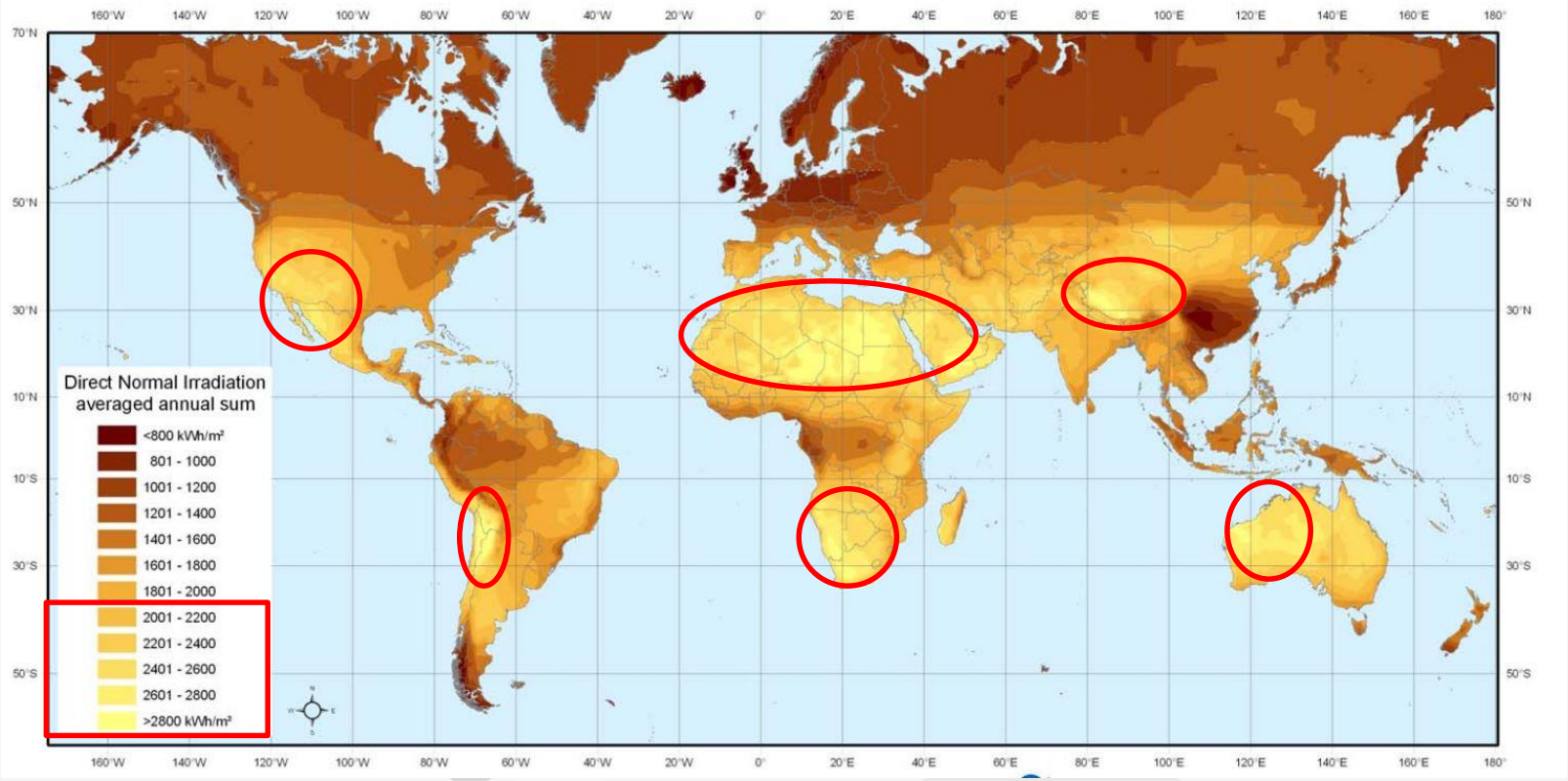
L'énergie solaire à concentration (CSP)



Müller-Steinhagen and Trieb, 2004

Le CSP remplace la source de chaleur des centrales électriques conventionnelles.

L'énergie solaire à concentration (CSP)

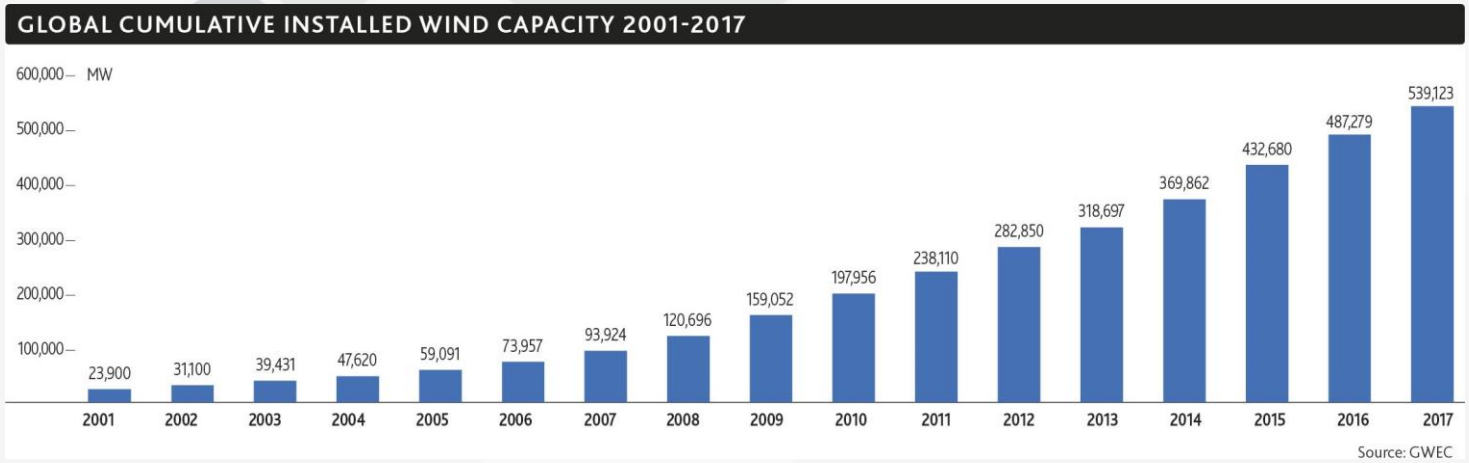


Trieb et al., 2009b

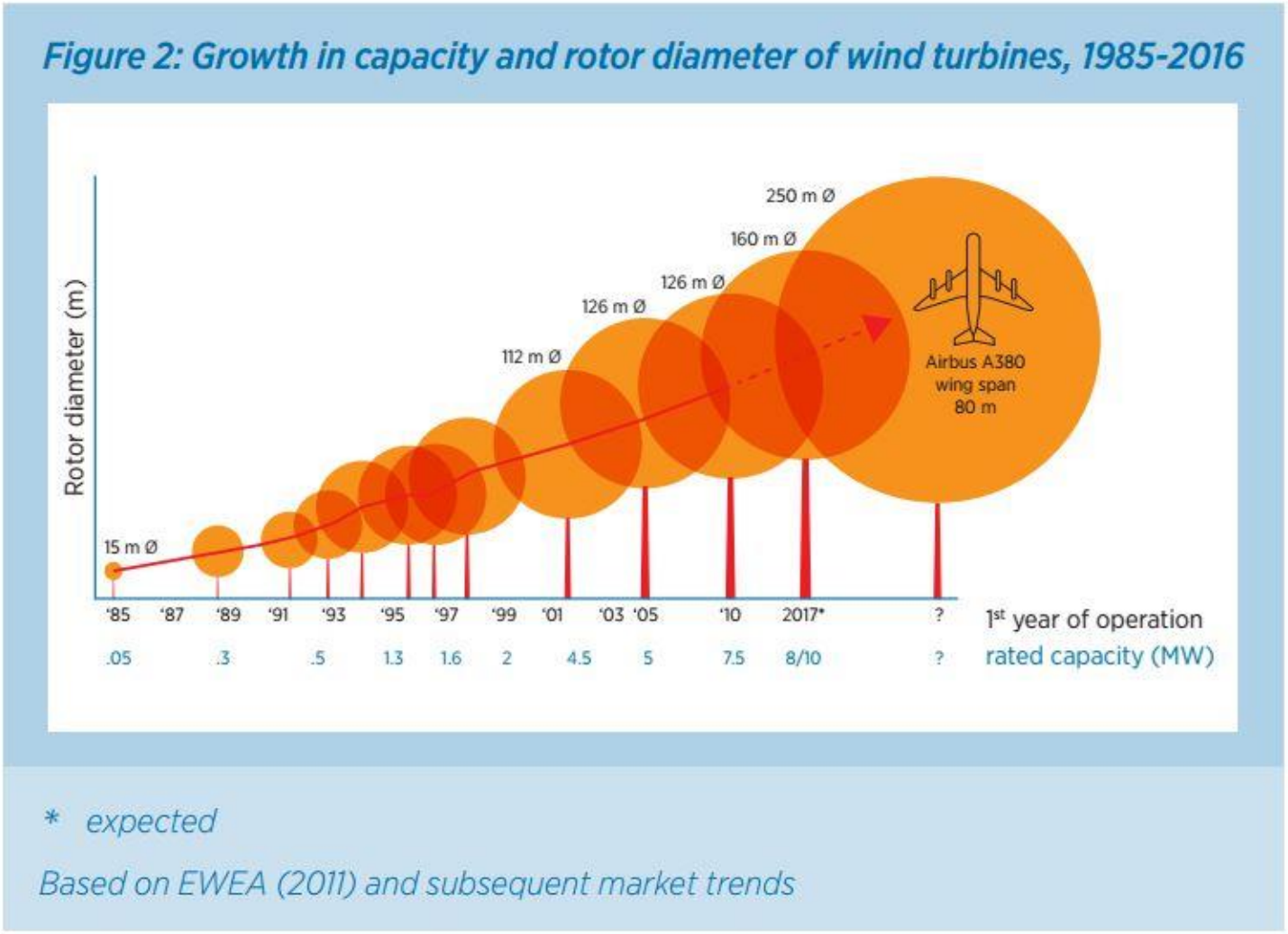
L'éolien terrestre et offshore

- Technologie renouvelable la plus mature
- Coûts de production : 17-100 $/MWh (25-30$/MWh au Maroc)
- **Progrès technologique** : installations de plus en plus grandes et performantes avec facteur de charge croissant
- Enjeux : variabilité de la production, acceptabilité sociale, impact local (faune)

Source: dayafterindia.com

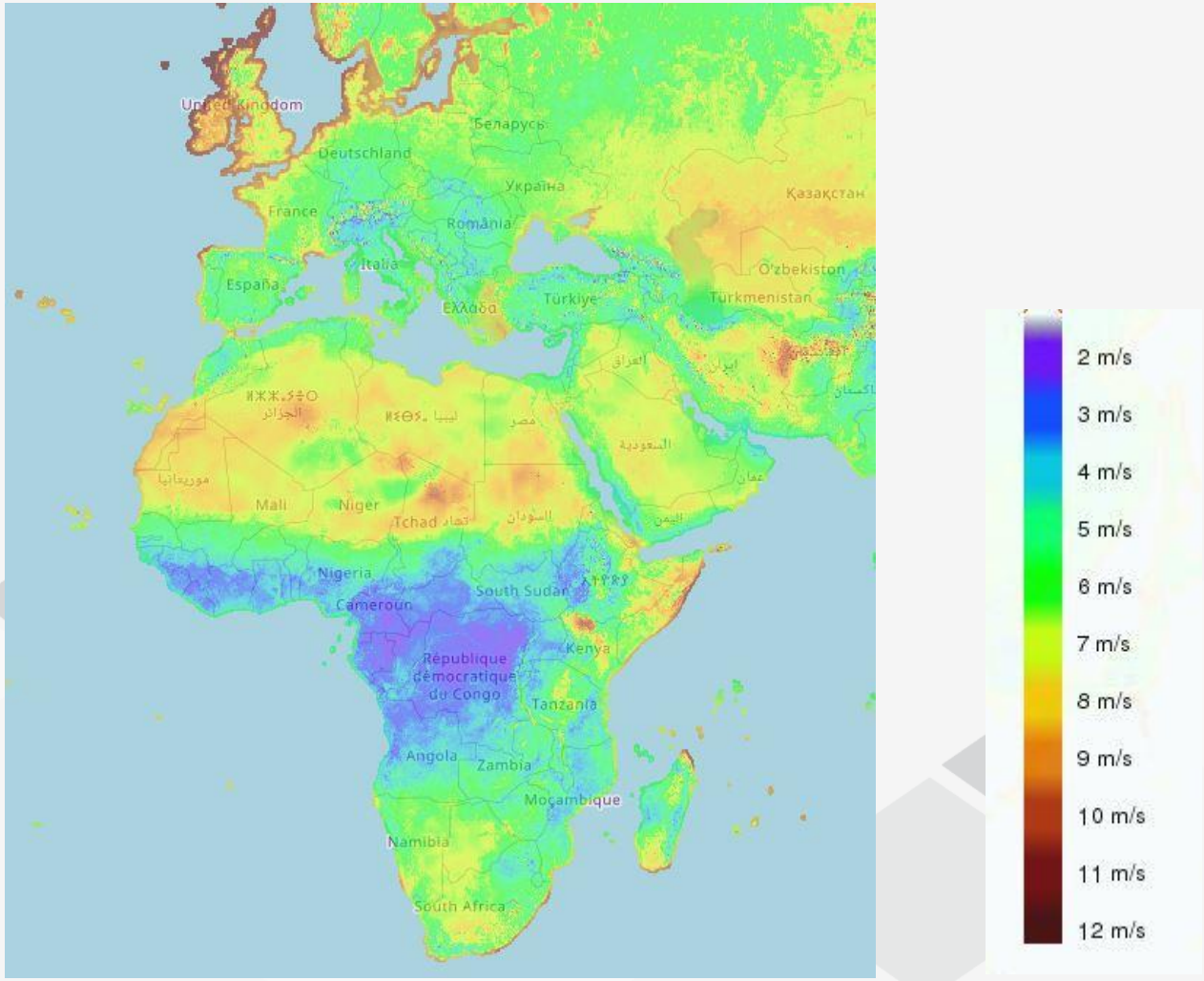


L'énergie éolienne



IRENA-ETSAP, 2016

L’énergie éolienne



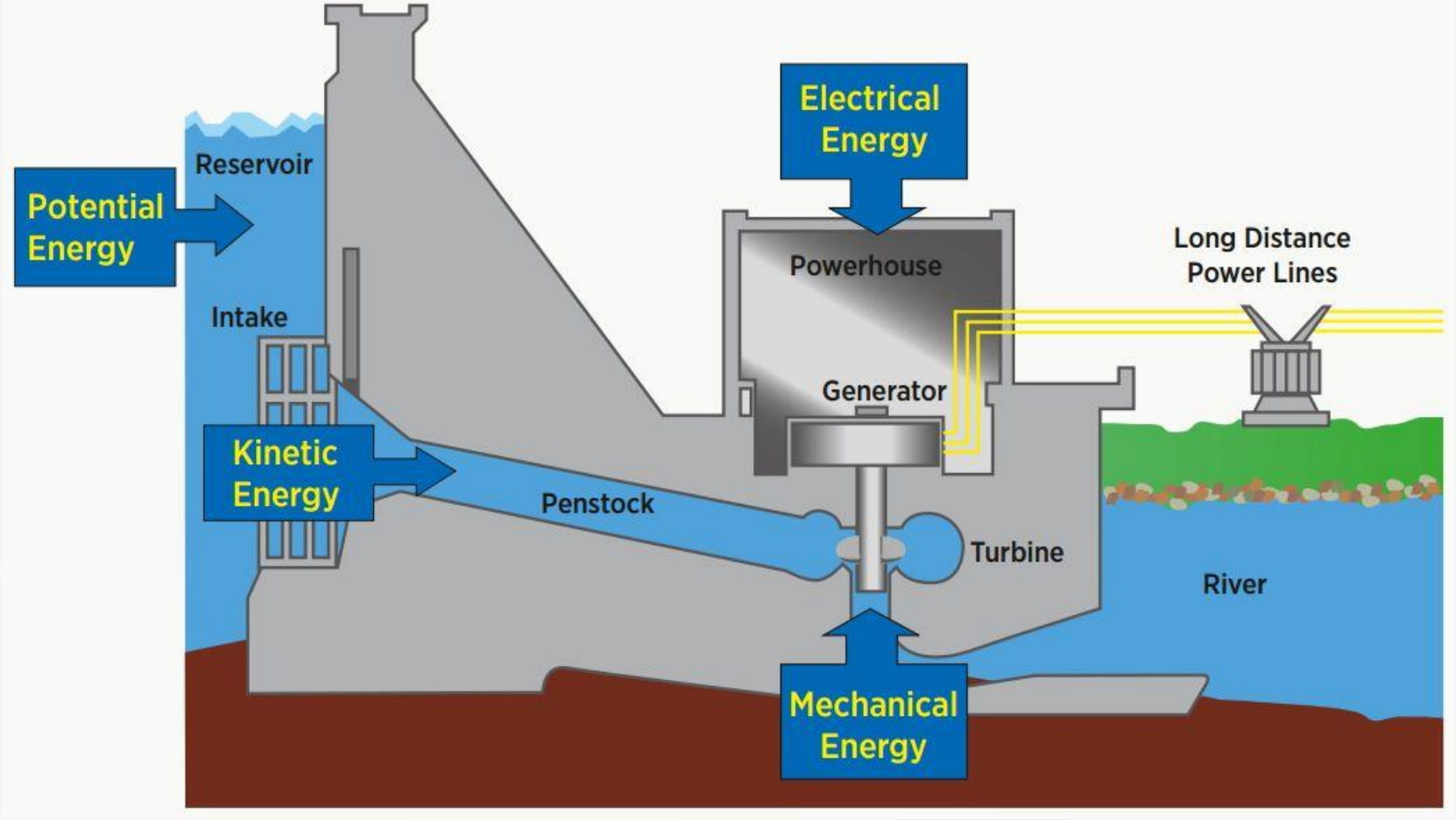
Global Wind atlas (https://irena.masdar.ac.ae/GIS/?map=103)

L’énergie hydraulique

L´énergie hydraulique:

- utilise l'énergie potentielle incorporée dans une masse d'eau en raison de son élévation et la convertit en électricité
- Le flux d'eau fait tourner une turbine qui fournit l'énergie mécanique nécessaire à alimenter un générateur
- Technologie entièrement commerciale, mature et fiable

L'énergie hydraulique



L’énergie hydraulique

Shermozle CC BY-SA 3.0

Murray CC BY-SA 2.0

L’énergie hydraulique

Potentiel

- En fonction de l'hydrologie (débit observé, précipitations, évapotranspiration potentielle, réseau fluvial, altitude....) (Kling et al., 2016)
- Un énorme potentiel encore inexploité en Afrique (~1844 TWh, IRENA, 2012b)Largement répandu
- Application flexible (petit -> grand ; suivi de charge ; stockage)

Impacts

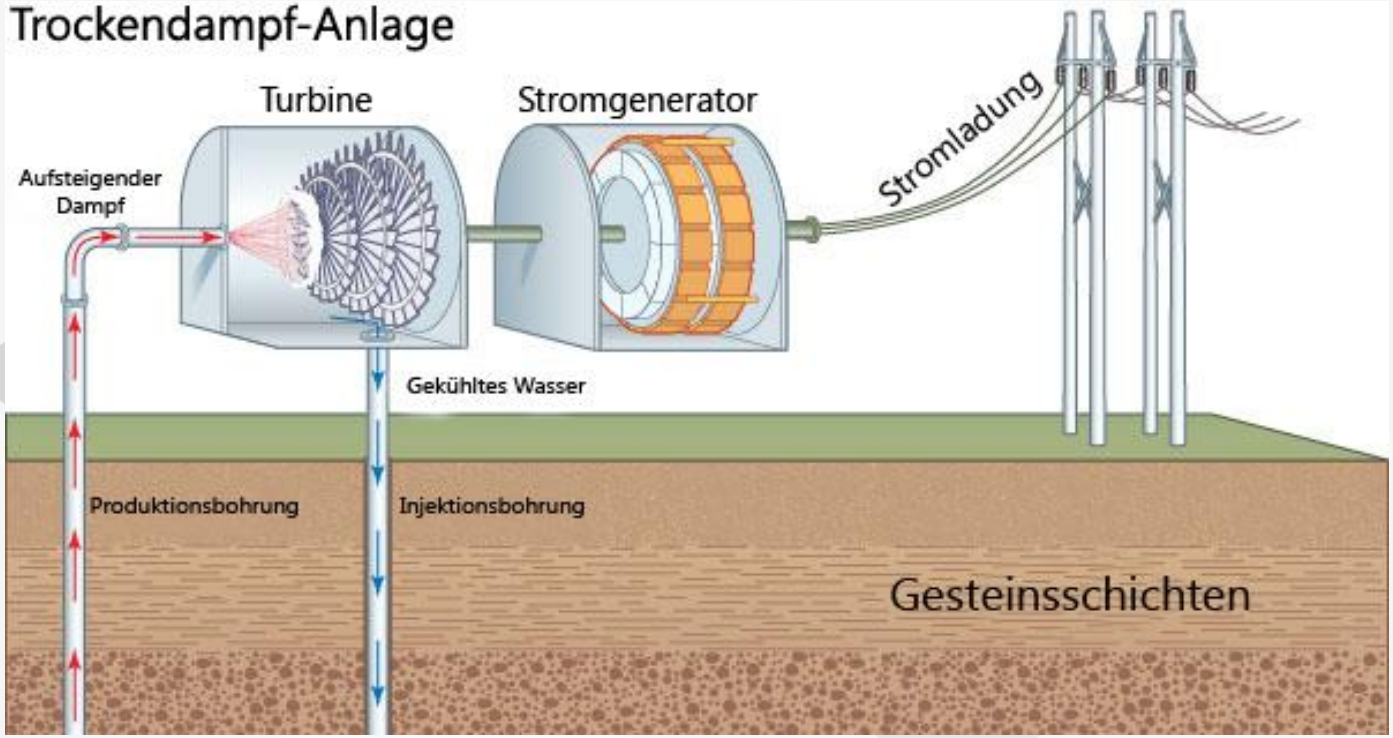
- Impacts sociaux et environnementaux ! (y compris les réinstallations), en particulier pour les grands barrages.
- Impacts du changement climatique !

L’énergie géothermique

- Utiliser la chaleur sous la surface de la terre
- L'eau / vapeur est utilisée pour transporter la chaleur géothermique à la surface et entraîner une turbine -> générateur -> électricité
- Facteurs de capacité élevés (charge de base / services auxiliaires)
- L'exploration est difficile (exploration de surface et opérations de forage)
- Les coûts varient fortement en fonction des sites

L'énergie géothermique

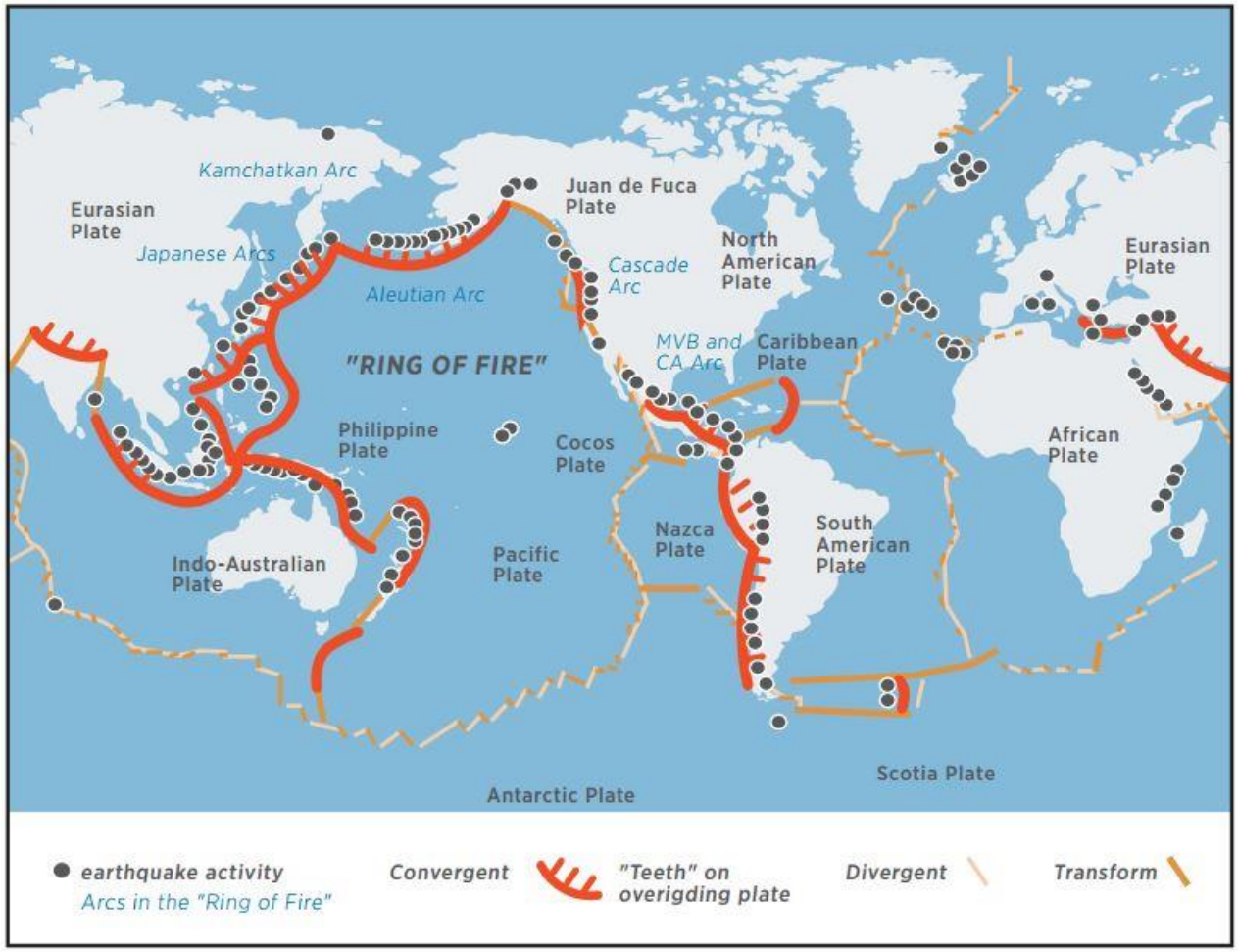
Types : Centrales à vapeur sèche



energieinitiative, 2015

L'énergie géothermique

Ressources



IRENA, 2017

Bioénergie

- Source : biomasse
- Sous la forme de bois, de feuilles, d'herbes, de graines et toutes autres formes que les plantes et les animaux peuvent prendre en tant qu'organismes vivants ou récemment morts
- doit être traité de manière à convertir la manière organique en un combustible capable de produire de l'énergie.
- La bioénergie est le terme utilisé pour désigner l'énergie, la chaleur ou l'électricité, qui est créée par la combustion de biocarburants.

Bioénergie

Qu’est ce que la biomasse? Quels sont ses potentiels et ses défis?

https://www.youtube.com/watch?v=-O9_Yje0nmk

L'intégration des ENR variables : un défi « insurmontable » ?

"Les énergies renouvelables, tells que le soleil, l'hydro et l'éolien ne peuvent couvrir plus de 4% de notre consummation électrique – même à long terme"

(Déclaration des énergéticiens allemands en 1993)

➔ ***Les énergies renouvelables représentent 36% de la consummation d'électricité allemande en 2017***

Nous pensions que le système électrique ne pourrait plus fonctionner avec une puissance éolienne supérieure à 500 MW. Aujourd'hui nous gérons une capacité éolienne plus de 5 fois supérieure.

Directeur du gestionnaire du réseau de transport danois, 2003

➔ ***En 2017, l'éolien (5,5GW) a couvert 44 % de la consommation danoise d'électricité***

Distinguer enjeux à court et long terme

« En utilisant une approche systémique, un système électrique comportant une part de production variable de 45 % ne génère qu'un coût additionnel minime à long terme par rapport à un système sans aucune production variable »

IEA, Power of Transformation 2014

Phase 1

- ENR-V n'ont aucun impact sur le système ou les centrales existantes
- La variabilité de la demande est plus importante

Phase 2

- ENR-V deviennent visibles pour le gestionnaire réseau ➔ légers ajustements

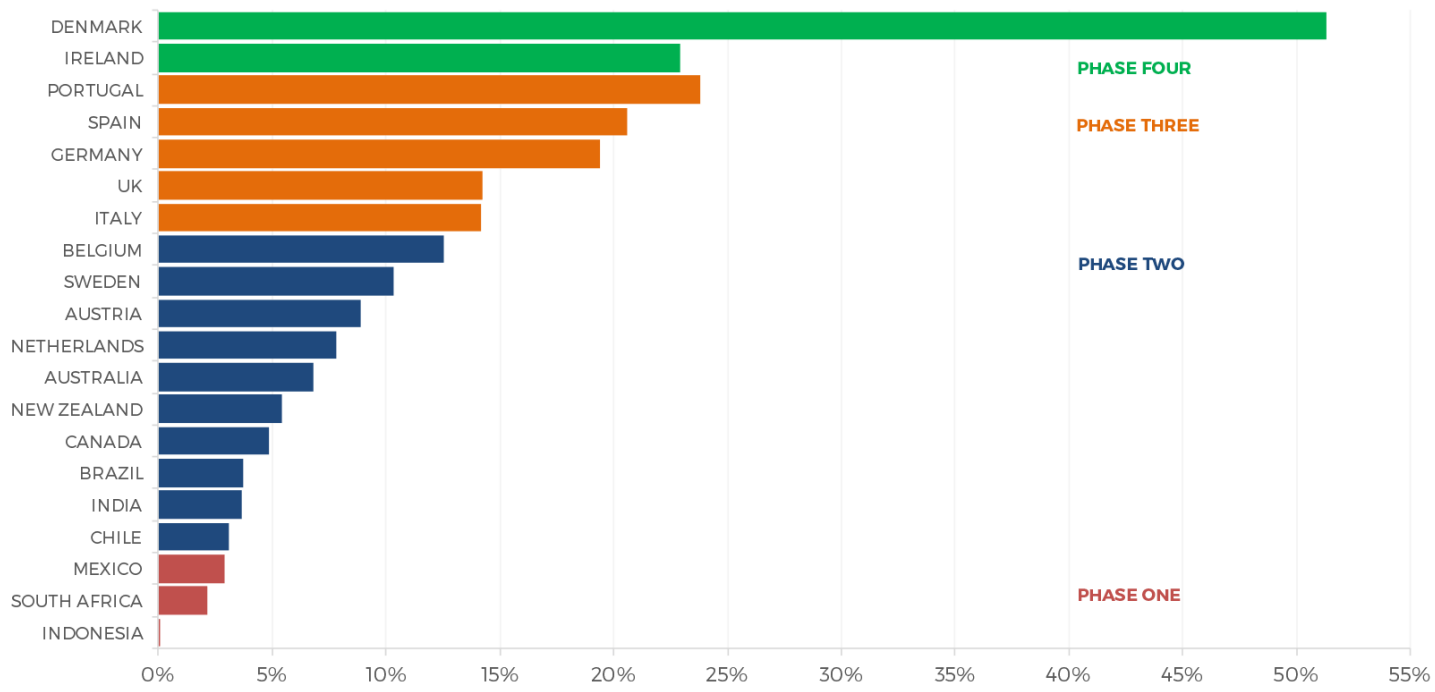
Phase 3

- Besoin de flexibilité croissant
- Changement d'utilisation des centrales conventionnelles

Phase 4

- Les ENR-V couvrent 100 % de la demande à certains moments
- Toutes les centrales doivent s'ajuster

Les phases de transformation du système



Getting Wind and Solar onto the Grid

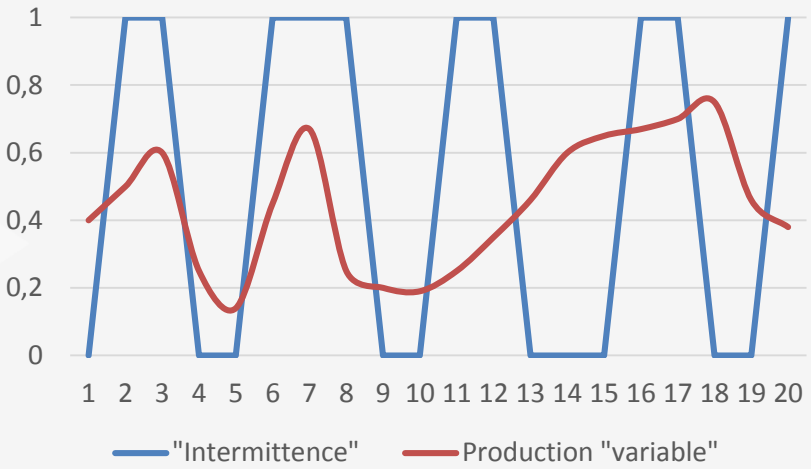
3. L'intégration des EnR aux systèmes et réseaux électriques, défis et solutions

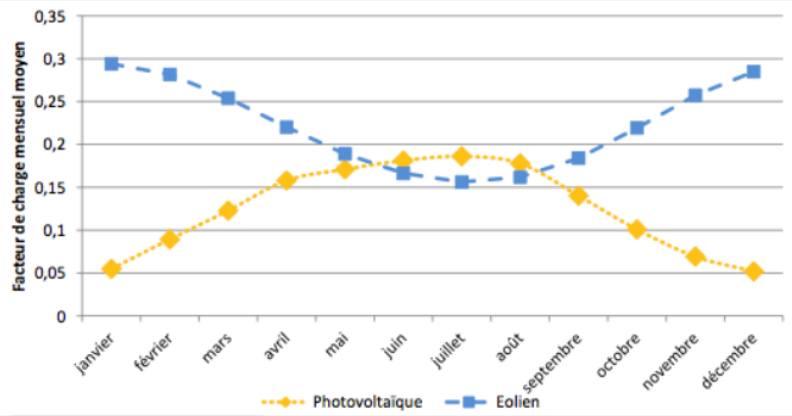
- **Une production variable n'est pas « intermittente » :** la production éolienne et solaire est <u>variable</u> en fonction de la météo mais elle est en grande partie <u>prévisible</u>

- **Complémentarité entre le solaire et l'éolien:** en France, l'éolien produit 2 fois plus en hiver qu'en été; le PV produit 3 fois plus en été qu'en hiver

- **Complémentarité avec les autres sources renouvelables « dispatchables » :** oui, 100 % d'électricité renouvelable c'est possible !

- **50 % de production variable, c'est déjà une réalité :** le cas du Danemark





L'intégration des ENR : retour d'expérience

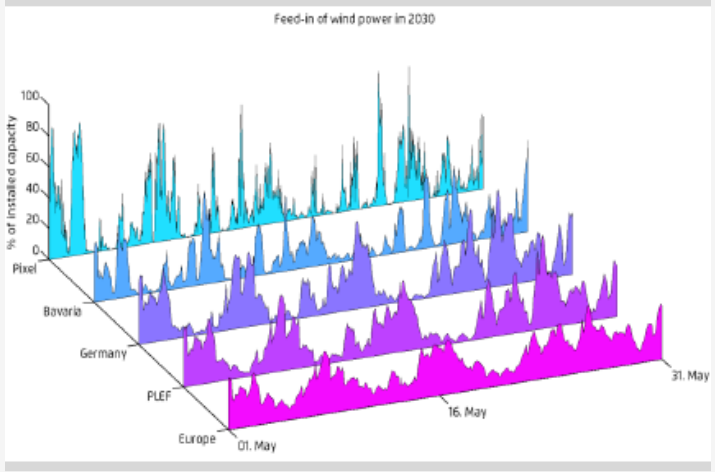
- Le **foisonnement géographique**: Plus on agrandit l'échelle géographique, plus on arrive à réduire <u>l'amplitude de la variabilité</u>

- Complète le foisonnement entre technologies (complémentarité et profils de production)

- **Facteur présent du côté de l'offre comme de la demande**

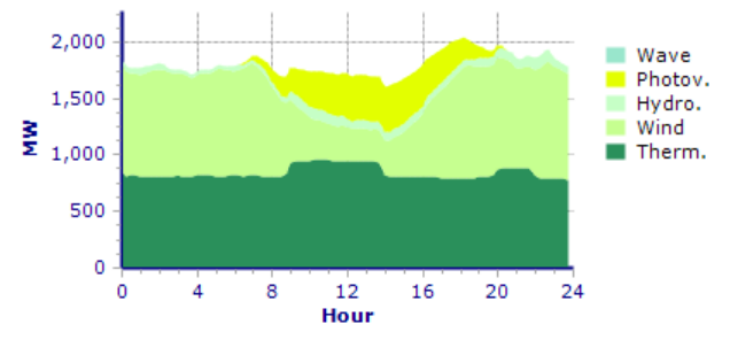
- Dans les pays chauds, la **courbe de charge PV** correspond en grande partie à la courbe de demande (besoin de climatisation)

Injection de l'éolien en 2030 à différents niveaux d'agrégation

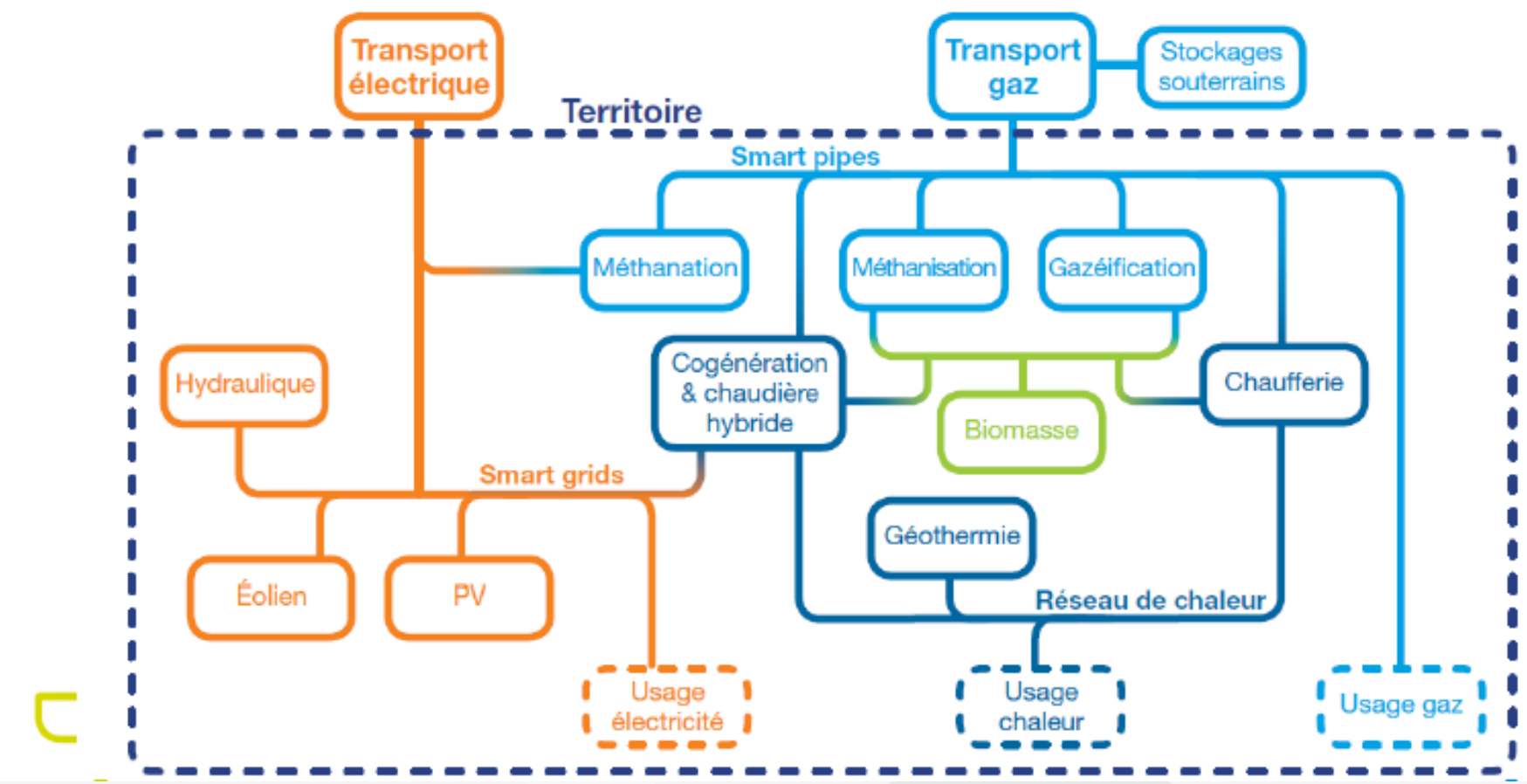


Agora Energiewende / Fraunhofer IWES (2015)

Production d'électricité au Portugal le 7 juillet 2018



L'intégration entre vecteurs énergétiques



Source: Grdf 2013

La clé de l'intégration : la flexibilité

- **Le pilotage de la demande :**
  - effacement de production (industriels / ménages) grâce à des signaux économiques ou techniques
  - l'enjeu des compteurs et réseaux intelligents : information détaillée en temps réel & pilotage
- **Les interconnexions :**
  - Renforcement du réseau électrique et interconnexions avec pays voisins = foisonnement
- **Le pilotage de l'offre :**
  - pilotage dynamique des capacités ENR par le gestionnaire réseau
  - écrêtement statique : réduction de la puissance maximale pour baisser la variabilité
  - écrêtement dynamique et autoconsommation : réduire la variabilité sur le réseau public
  - pilotage de centrales *back-up* flexibles gaz (CCGT), biomasse, hydro
- **Le stockage :**
  - Renouvelable : hydro (Step), CSP (y compris avec apport extérieur!), Power-to-gas, PtH
  - Batteries : à grande échelle ou décentralisés (bâtiments, véhicules)

Merci pour votre attention!

Des questions?

Sources

- Ellabban, O. Abu-Rub, H. and Blaabjerg, F. (2014): Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39:748–764.
- Energieinitiative (2015): So funktioniert ein Geothermie-Kraftwerk. Site: http://energieinitiative.org/so-funktioniert-ein-geothermie-kraftwerk/
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE (2017): PHOTOVOLTAICS REPORT.
- Hoyer-Klick, C. (2012): Introduction to Solar Resource Assessments.
- IEA, International Energy Agency (2002): Renewable Energy…into the Mainstream. Novem. The Netherlands.
- IFC, International Finance Corporation (2015): Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. A Project developer's guide. Washington, DC.
- IRENA, International Renewable Energy Agency (2012): Renewable Energy Technologies: Cost analysis series. Hydropower. (Volume 1: Power Sector. Issue 3/5).
- IRENA, International Renewable Energy Agency (2012b): Prospects for the African Power Sector. Scenarios and Strategies for Africa Project.
- IRENA, International Renewable Energy Agency (2017): GEOTHERMAL POWER. TECHNOLOGY BRIEF.
- IRENA, International Renewable Energy Agency (2017b): REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. Abu Dhabi.
- IRENA-ETSAP, International Renewable Energy Agency - ENERGY TECHNOLOGY SYSTEMS ANALYSIS PROGRAMME (2016): Wind Power. Technology Brief.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2012): Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Kling, H., Stanzel, P. and Fuchs, M. (2016): Regional assessment of the hydropower potential of rivers in West Africa. In: *Energy Procedia* 97:286 – 293
- Müller-Steinhagen, H. and Trieb, F. (2004): Concentrating Solar Power. A review of Technology. Quarterly of the Royal Academy of Engineering Ingenia 18.
- RECP, Africa-EU Renewable Energy Cooperation Programme (2014): Mini-grid Policy Toolkit. Policy and Business Frameworks for Successful Mini-grid Roll-outs.
- REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2016): RENEWABLES 2016. GLOBAL STATUS REPORT.
- REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2017): Renewables Global Futures Report: Great debates towards 100% renewable energy. Paris.
- Schinke, B., Terrapon-Pfaff, J., Borbonus, S., Viebahn, P., Fink, T., & Brand, B. (2015). Energy and development: exploring the local livelihood dimension of the Noor I CSP project in Southern Morocco. (Final Report). Bonn & Wuppertal: Germanwatch & Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.+
- Stephen Karekezi, Kusum Lata, Suani Teixeira Coelho (2004), Traditional Biomass Energy Improving its Use and Moving to Modern Energy Use, Secretariat of the International Conference for Renewable Energies Bonn
- Trieb, F., Müller-Steinhagen, H., Kern, J., Scharfe, J., Kabaritid, M. and Al Taher, A. (2009a): Technologies for large scale seawater desalination using concentrated solar radiation. In: *Desalination* 235:33–4.
- Trieb, F., O'Sullivan, M., Pregger, T., Schillings, C. and Krewitt, W. (2009b): Characterisation of Solar Electricity Import Corridors from MENA to Europe. Potential, Infrastructure and Cost.

Site Web:
- http://www.biomass.net/Biomass-and-Bioenergy.html