

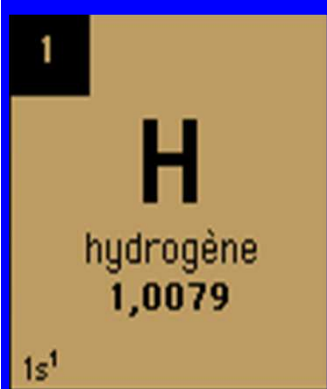


ENERGIES

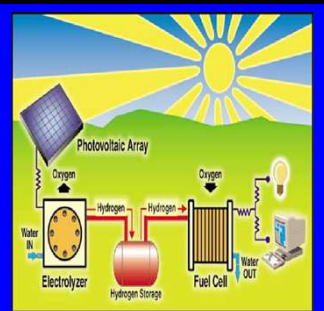
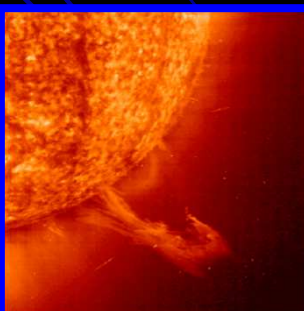
Fossiles,
Fissiles, Renouvelables
&
Nouvelles

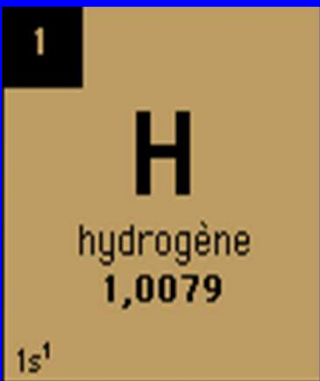
**Resources,
technologies
et environnement**

Par Prof. A. Boudghene Stambouli



S'il est un sujet de préoccupation actuel, mêlant enjeux politiques, économiques, technologiques et environnementaux, c'est bien celui de **l'Energie**



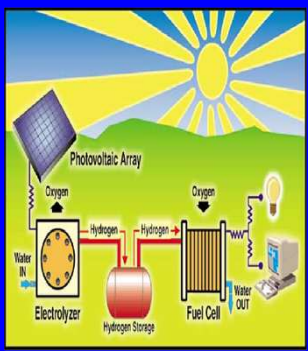
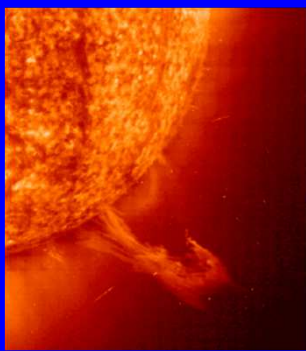


Formes d'énergie

Fossile, fissile, renouvelable et nouvelle énergies

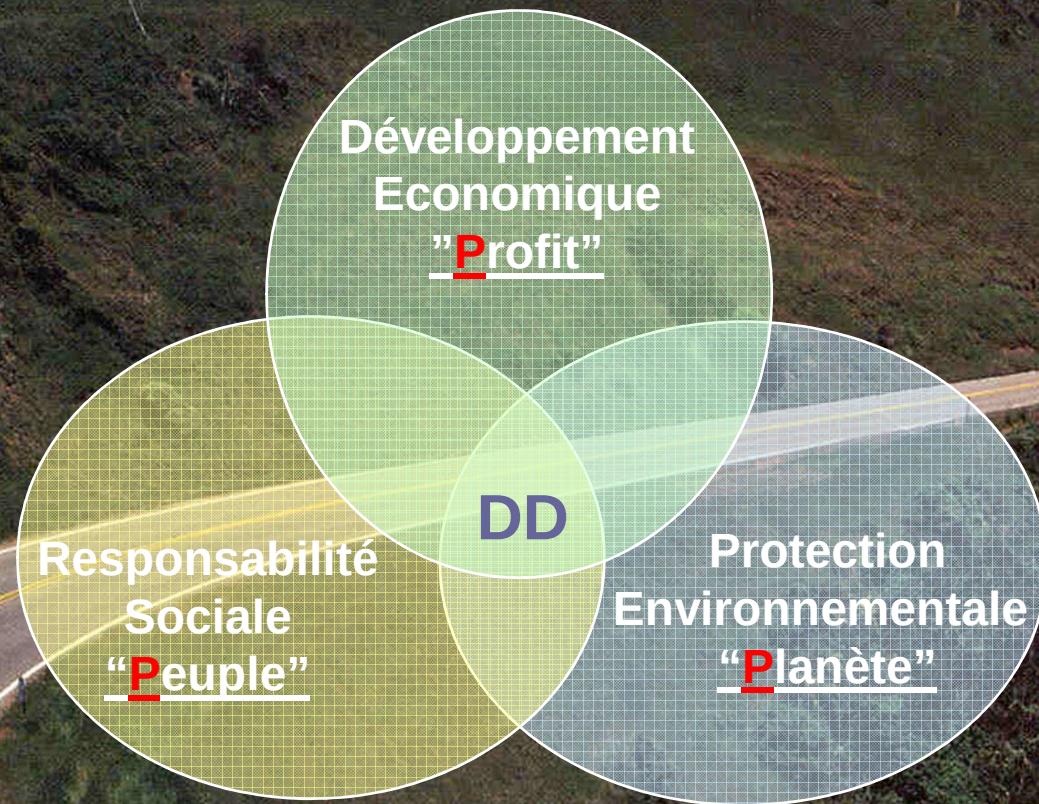
Energie

- Mécanique
- Chimique
- Electrique
- Nucléaire
- Thermique



Le Développement durable

Elements du Développement durable





Energy Efficiency

Energy Access

Sustainable Development by WCED :
[Meeting the needs of the present without
compromising the ability of future
generations to meet their own needs]

Répondre aux besoins du
présent sans mettre en péril
la capacité de générations
futures pour répondre à
leurs propres besoins



Défis extraordinaires d'un futur système énergétique



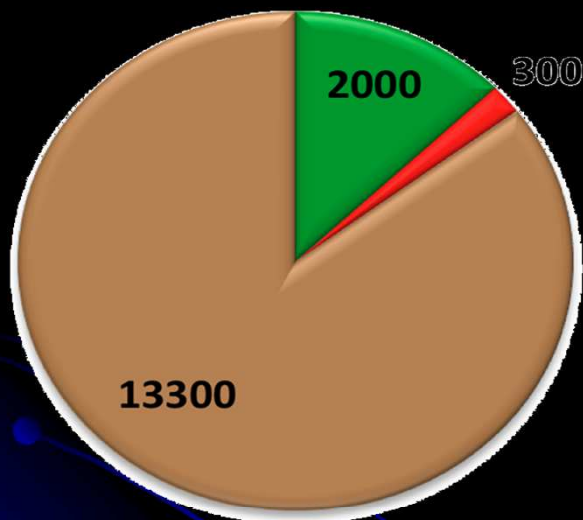
- Croissance de la population mondiale
- La demande croissante d'énergie par habitant
- 2008: ~16 000 GW
- 2050: ~24 000 GW ?

1 GW = 8.8 TWh/an

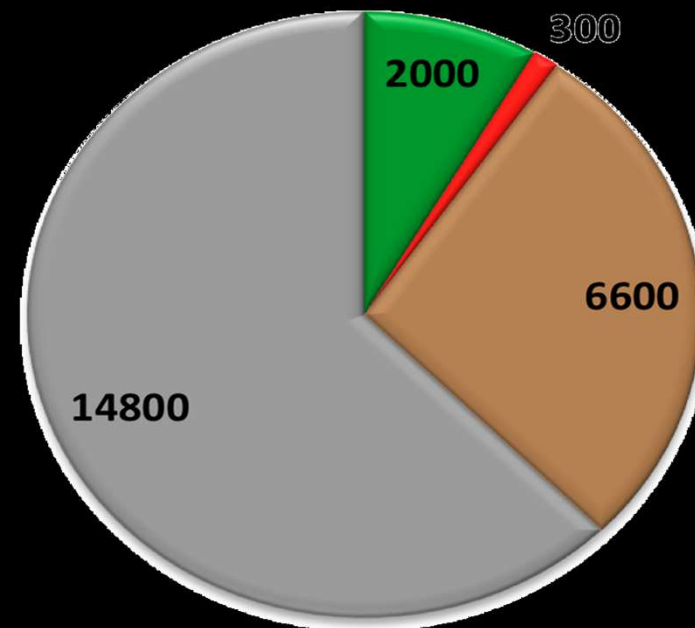
1 GW_{el} = Une centrale nucléaire

Défis extraordinaires d'un futur système énergétique

Puissance mondiale
2008 (en GW)



Puissance mondiale
2050 (en GW)
Réduction de combustibles fossiles de 50%



L'équivalent de 15 000 réacteurs nucléaires supplémentaires sont nécessaires.
Un réacteur nucléaire chaque jour - sur 40 ans

Défis extraordinaires d'un futur système énergétique

Le renforcement des capacités de 1 GW/jour est nécessaire

Le futur système énergétique doit être:

- simple
- sans danger
- inépuisable

Potentiel économique de grandes zones:

Il y a une abondance des zones appropriées pour l'énergie renouvelable, le solaire entre autre (Sahara=8600000 km²). Personne n'est propriétaire de ressources solaires et personne ne peut les épuiser. Il n'est pas nécessaire de les épargner pour plus tard.

L'énergie solaire est toujours décentralisée. L'énergie électrique produite ne peut pas être épargnée pour plus tard. Un réseau électrique mondial est une situation gagnant-gagnant.

Quelle alternative?

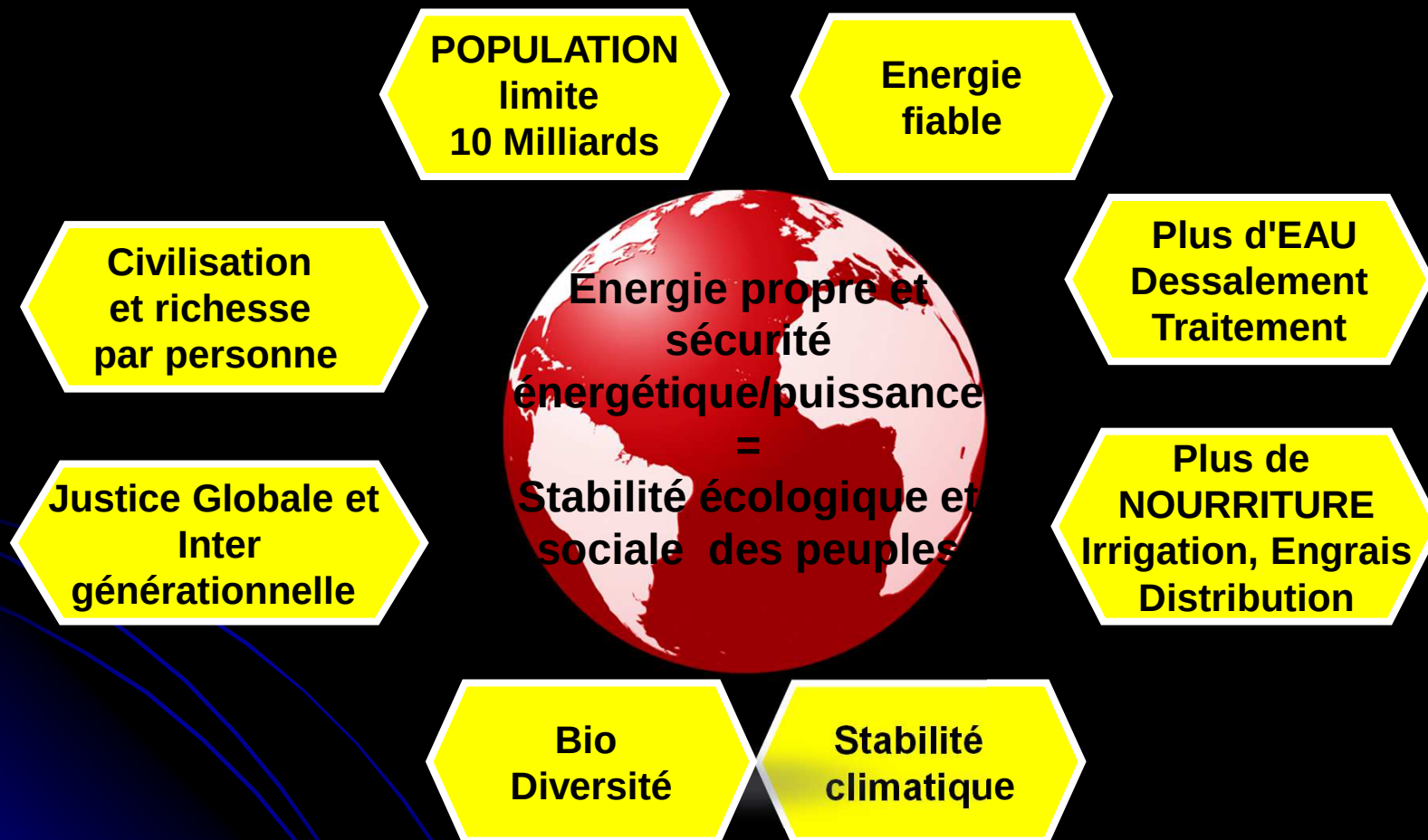
L'alternative devrait répondre à deux conditions nécessaires et suffisantes :

La source d'énergie doit être inépuisable à l'échelle de la planète

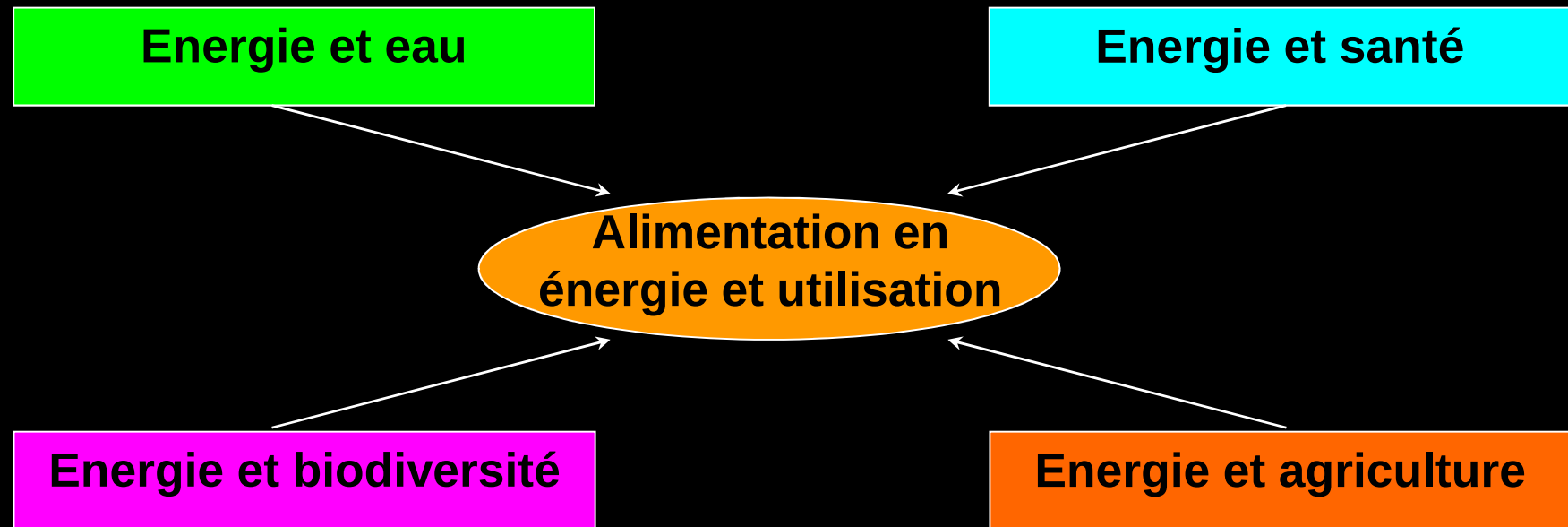
La source d'énergie doit être sans support ou munie d'un support recyclable

Les énergies renouvelables : pour que le progrès serve mieux l'avenir de l'humanité

L'énergie propre et sécurité énergétique: clefs à un monde durable



Liaison énergies et autres questions de développement durable



Toutes ces motivations démontrent combien le domaine des énergies est pluridisciplinaire. Les approches sociologiques, économiques et politiques ne doivent pas être négligées.

C'est quoi l'énergie?

E
N
E
R
G
I
E

Mesure

Propriété

Plurielle

Différentes manifestations de l'énergie

**E
N
E
R
G
I
E**

Moteur de l'univers

**Moteur de tous les
processus fondamentaux
de la nature sur terre**

**Moteur de l'économie
mondiale**

« Il est important de réaliser que, dans la physique d'aujourd'hui, nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie »

Richard Philippe Feynman,
Prix Nobel (1965)



Physicien américain

(1918 - 1988)

Energie

Sources d'énergie

Crise de l'énergie

Coût de l'énergie

Economie de l'énergie

.....

Origine du mot énergie

Le mot énergie vient du mot latin *energia* qui vient lui-même du grec : *ενεργεια*, *energeia* (en, dans, et ergon, action) qui signifie « force en action »



Thomas Young, Physiologiste, physicien et linguiste anglais

Introduction en 1805 du terme énergie en remplacement de l'expression force vive

1773 - 1829

William Rankine, Ingénieur et physicien écossais

Nouvelle naissance du terme énergie avec l'élaboration de la science qu'il appela énergétique



1820 - 1872

C'est quoi l'énergie?

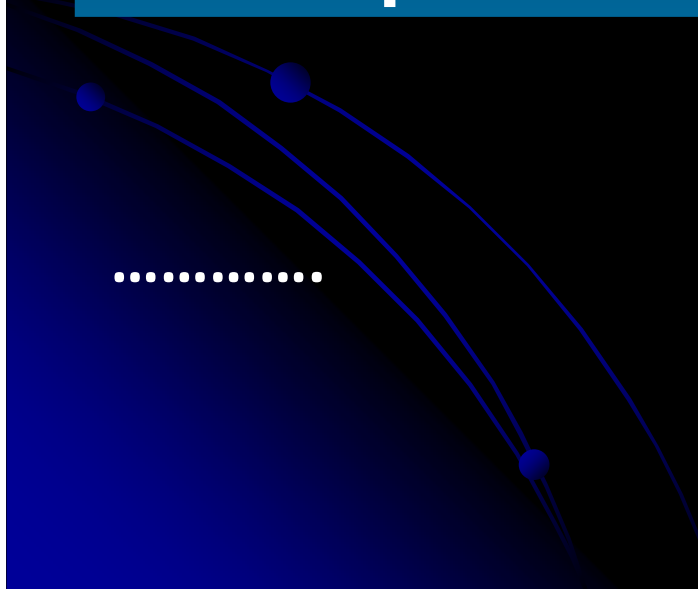
Le petit Larousse : « L'énergie est la faculté que possède un corps de fournir un travail »

Et le travail?

C'est le produit d'une force par le déplacement de son point d'application." **D'après Le Robert.**

Et la force?

.....



L'énergie

L'énergie est, après l'eau et la nourriture, une ressource indispensable pour l'humanité. Elle a contribué d'une façon décisive au développement économique et technique, d'un pays, au cours des âges. Celui-ci c'est notablement accéléré au cours du vingtième siècle grâce, notamment, à des sources d'énergie, concentrées, abondantes et peu coûteuses. L'apparition de l'électricité, vecteur énergétique très commode, a révolutionné l'usage de l'énergie dont les énergies renouvelables et aborde actuellement le sujet de l'hydrogène, vecteur énergétique du future.

Energie (suite...)

- Par définition c'est la capacité de travailler qu'est capable de libérer un corps. On la mesure par le travail mécanique que ce corps, ou ce système, est susceptible d'effectuer. D'une manière pragmatique, un système ou un corps possède de l'énergie s'il peut fournir du travail ou de la chaleur;
 - Selon cette définition l'essence ou le gaz possède de l'énergie puisque nous pouvons l'utiliser pour propulser un véhicule et en brûlant, peut fournir de la chaleur.

Energie (suite...)

- L'énergie est présente partout;
- Les sources actuelles d'énergie sont :
 - la houille;
 - le charbon;
 - le pétrole et le gaz;
 - le nucléaire;
 - le soleil, l'eau, le vent, la biomasse traditionnelle et nouvelle, géothermie;
 - l'hydrogène...

Situation énergétique mondiale

- 81% des réserves mondiales en hydrocarbures brutes sont en possession de huit pays;
- Six pays ont 70 % des réserves du gaz naturel;
- Huit pays ont 89% de toutes les réserves du charbon;
- La demande mondiale en énergie augmente exponentiellement, en 2020 la demande sera 50-80% de plus que les niveaux de 1990 (WEC);
- La demande mondiale en énergie primaire, en 2050, augmentera de 1.5-3 fois plus que les niveaux de 1998 (WEC)

Situation énergétique mondiale (suite)

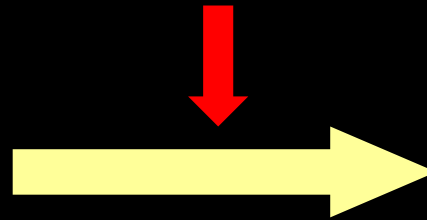
- La dépendance en énergie à partir des combustibles fossiles atteint ses limites: la déplétion des réserves en pétrole, gaz naturel et charbon est pour quelques **dizaines** d'années seulement !



Lecture de l'histoire de l'énergie dans l'histoire de l'homme

La trace de l'énergie

Souci d'alléger le fardeau du travail



Invention des machines

-500.000 ans :

Rendement

20-25%

Puissance :

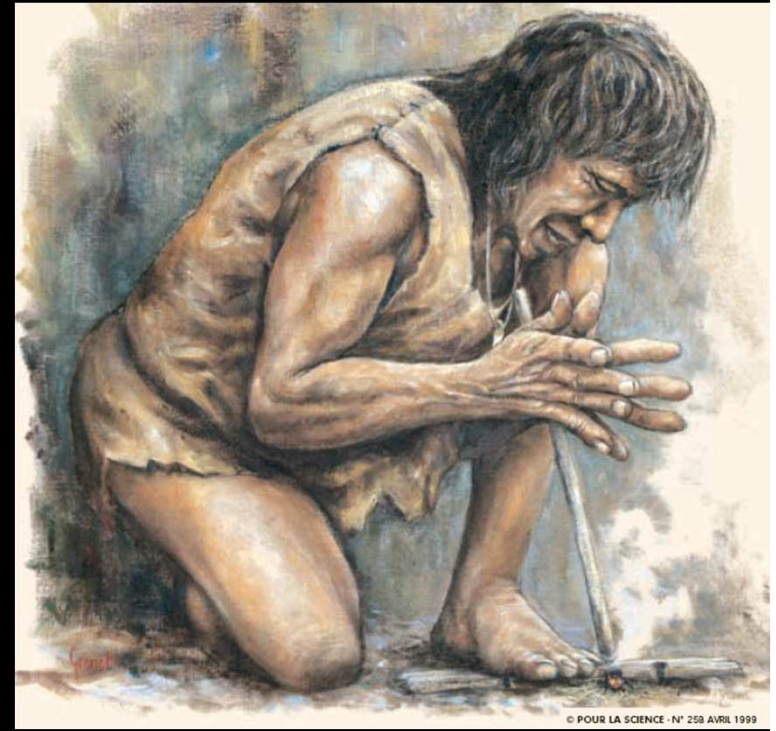
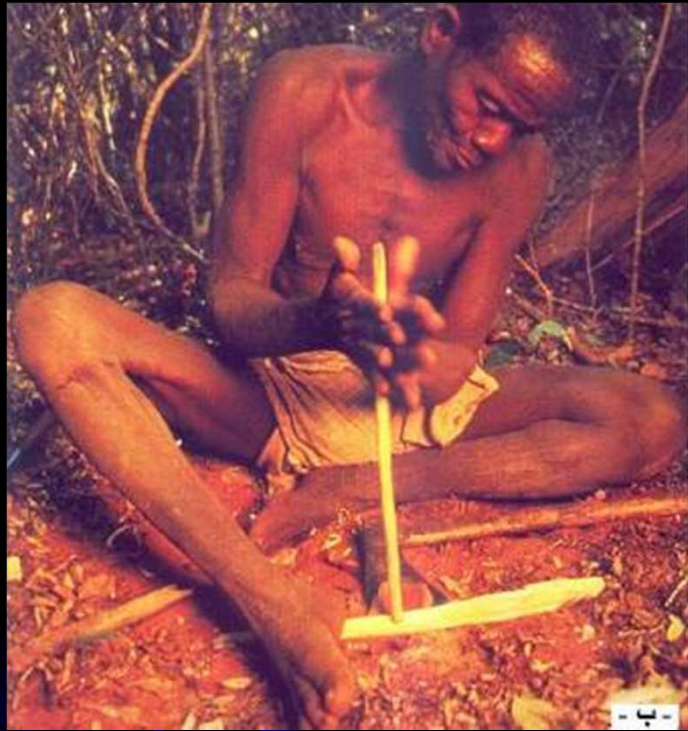


50-90W

100 W (effort intense)



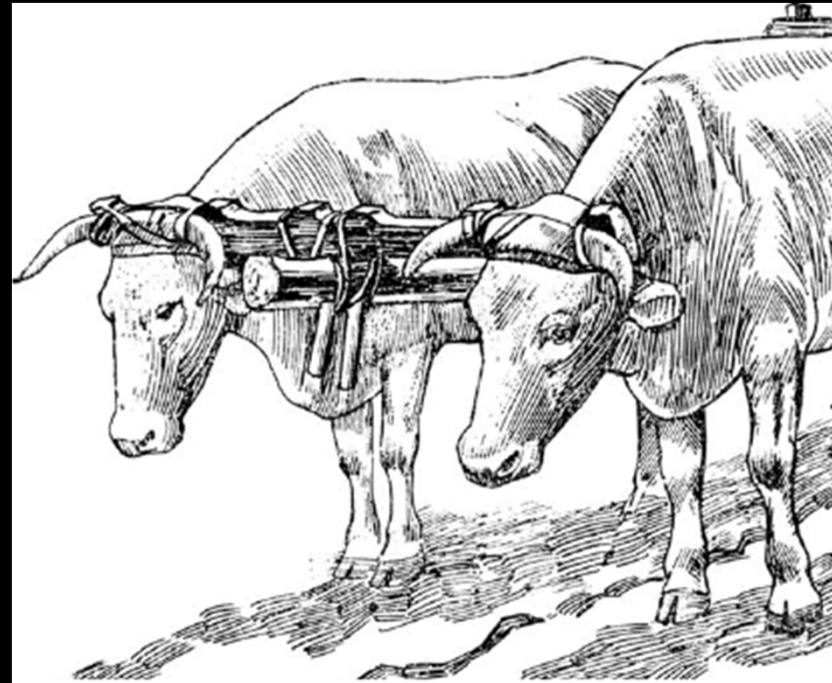
Découverte du feu



Développement de l'agriculture

Bovins : 299-300 W

Chevaux : 500 W



Apparition du moulin à eau et du moulin à vent



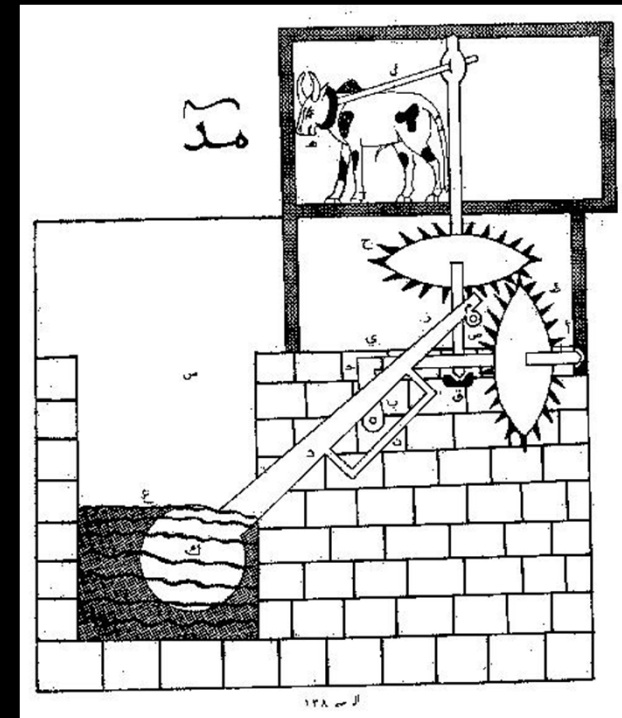
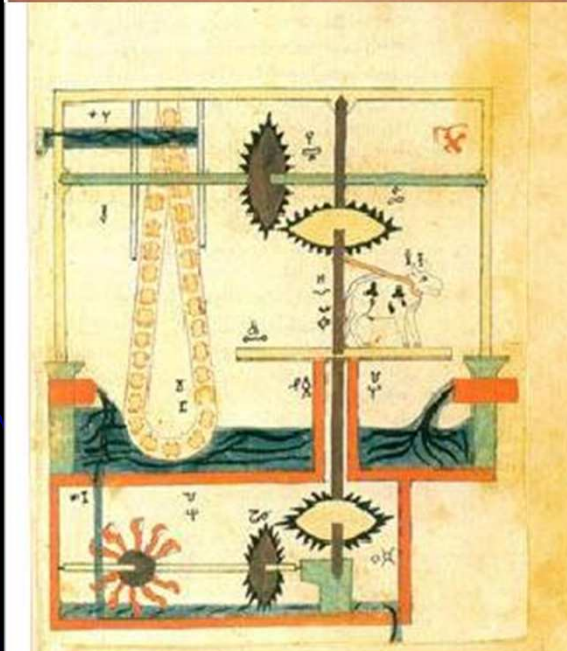
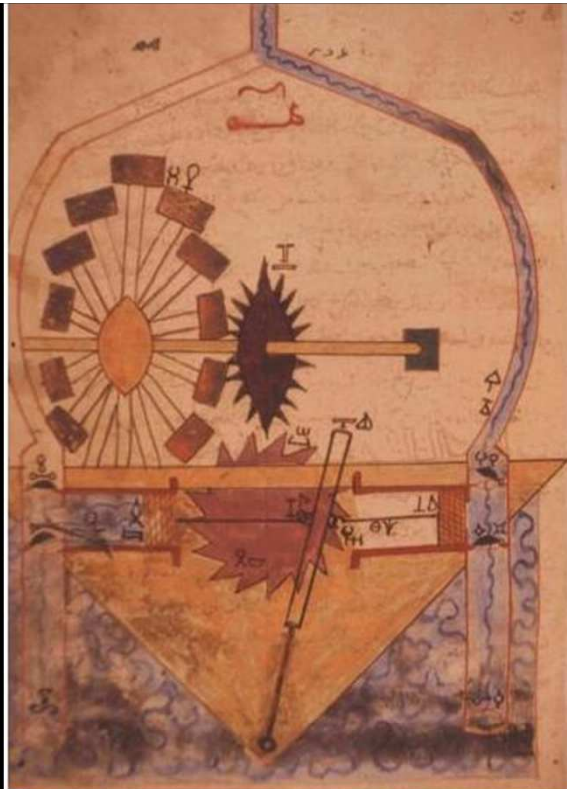
L'usage de la force hydraulique a joué un rôle essentiel dans la métallurgie qu'elle a élevée au rang d'une industrie lourde. L'énergie hydraulique a permis grâce à l'utilisation de soufflets d'obtenir une meilleure combustion du charbon de bois par un apport régulier d'oxygène.



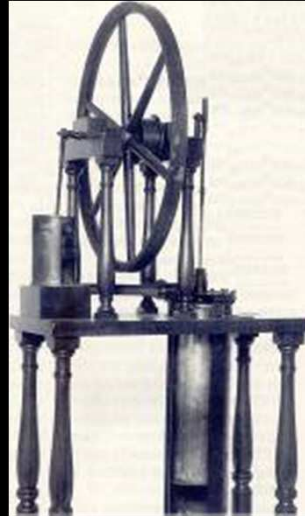
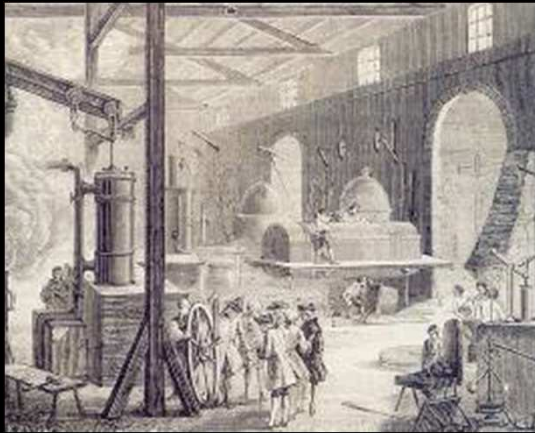


Al jazari

**Taqi Al Dine en 1551
: «Méthodes
sublimes des
machines
spirituelles »**



L'Énergie et les transformations technologiques dans la révolution industrielle

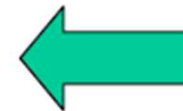


L'Éolipyle d'Héron d'Alexandrie

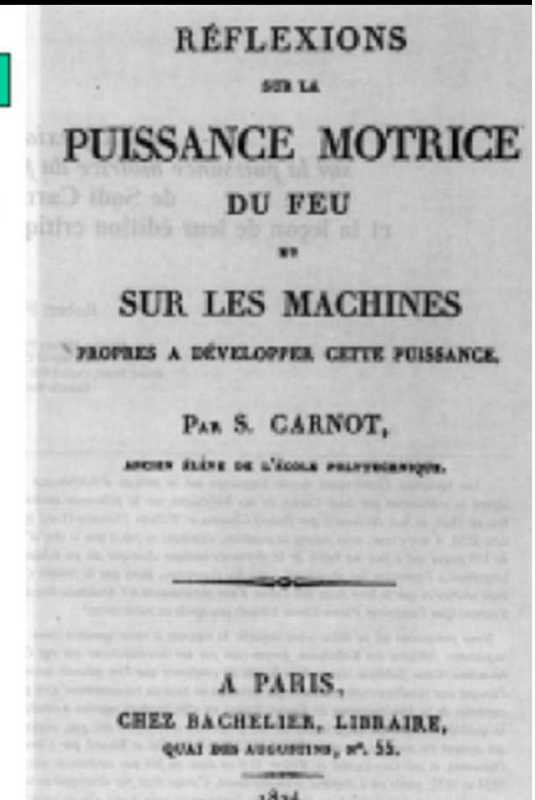
L'Énergie et les transformations technologiques dans la révolution industrielle



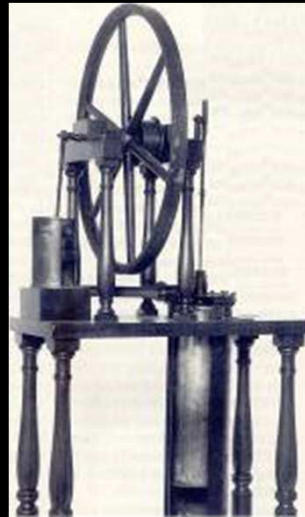
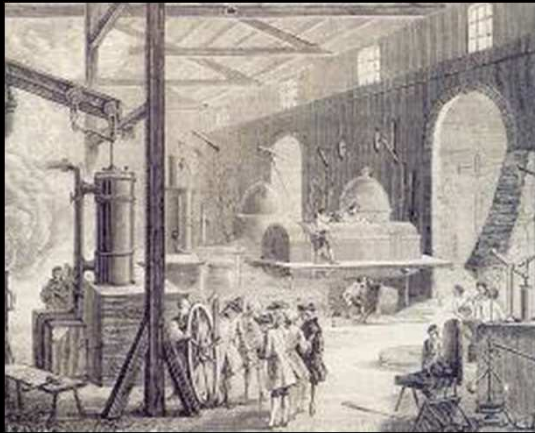
1824 (118p, 600 ex.)



"Qu'arrive-t-il en effet dans une machine à vapeur actuellement en activité ? Le calorique, développé dans le foyer par l'effet de la combustion, traverse les parois de la chaudière, vient donner naissance à de la vapeur, s'y incorpore en quelque sorte. Celle-ci, l'entraînant avec elle, le porte d'abord dans le cylindre, où elle remplit un office quelconque, et de là dans le condenseur, où elle se liquéfie par le contact de l'eau froide qui s'y rencontre. L'eau froide du condenseur s'empare donc en dernier résultat du calorique développé par la combustion. Elle s'échauffe par l'intermédiaire de la vapeur, comme si elle eût été placée directement sur le foyer. La vapeur n'est ici qu'un moyen de transporter le calorique; elle remplit le même office que dans le chauffage des bains par la vapeur, à l'exception que, dans le cas où nous sommes, son mouvement est rendu utile"



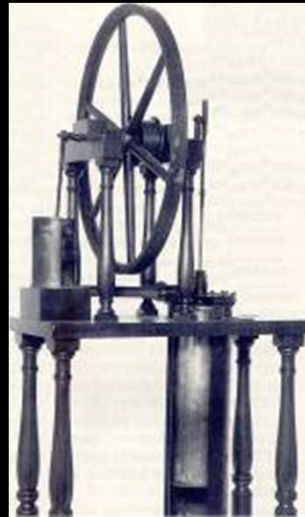
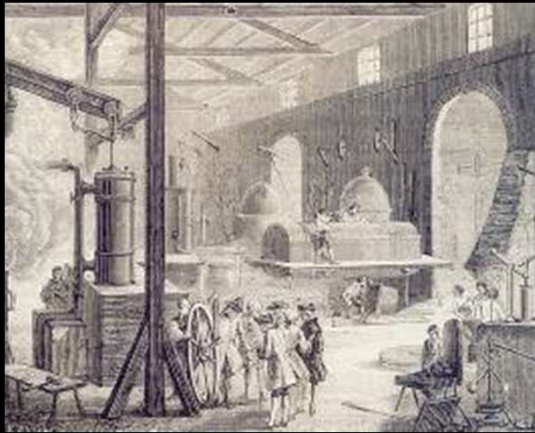
L'Énergie et les transformations technologiques dans la révolution industrielle



'Naissance de la thermodynamique

La question dont est née la thermodynamique ne concerne pas la nature de la chaleur ou de son action sur les corps mais l'utilisation de cette action. Il s'agit de savoir sous quelles conditions la chaleur produit de l'énergie mécanique, c'est-à-dire peut faire tourner un moteur.

L'Énergie et les transformations technologiques dans la révolution industrielle



'Le premier principe de la thermodynamique :



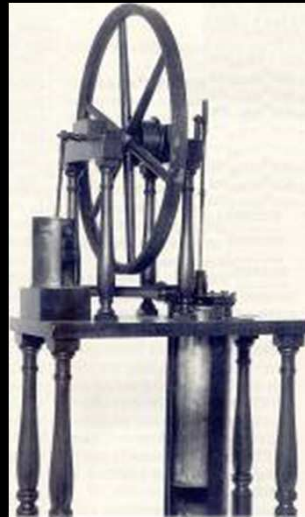
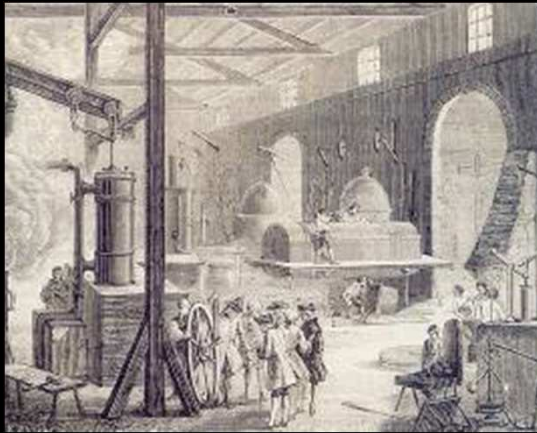
Julius Robert Mayer, 1842 :

**L'énergie ne peut être ni créée, ni détruite, mais
seulement transformée d'un système à un autre et
d'une forme d'énergie à une autre**

1814 - 1878

Médecin et physicien allemand

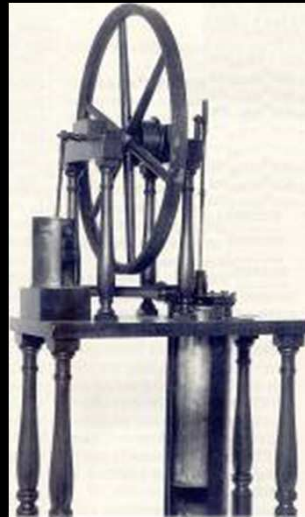
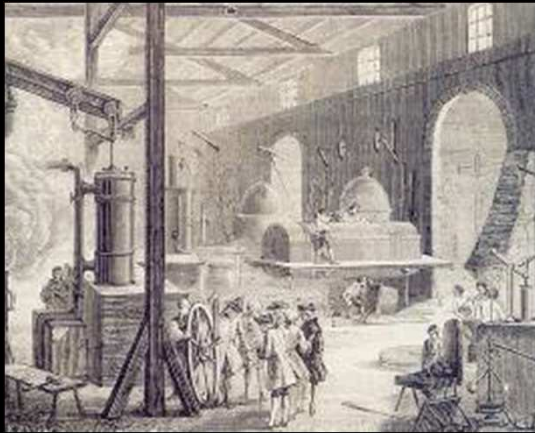
L'Énergie et les transformations technologiques dans la révolution industrielle



'Naissance de la thermodynamique

La question dont est née la thermodynamique ne concerne pas la nature de la chaleur ou de son action sur les corps mais l'utilisation de cette action. Il s'agit de savoir sous quelles conditions la chaleur produit de l'énergie mécanique, c'est-à-dire peut faire tourner un moteur.

L'Énergie et les transformations technologiques dans la révolution industrielle



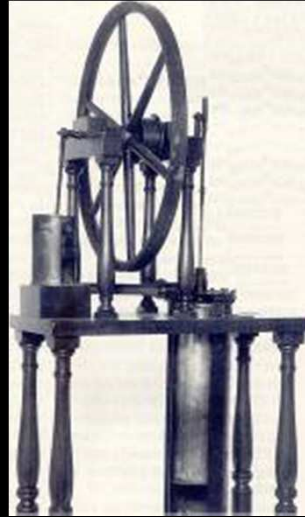
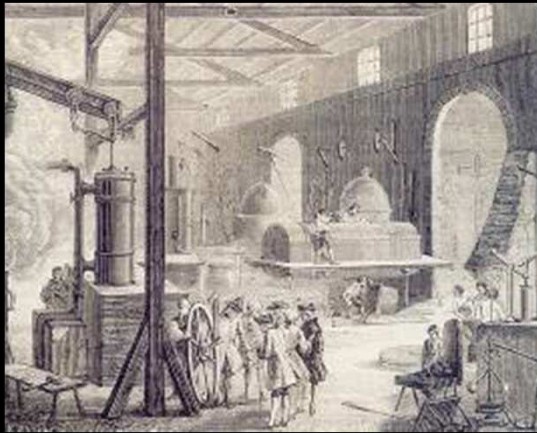
'Le deuxième principe de la thermodynamique :

On ne peut pas utiliser entièrement à notre profit l'énergie dont on dispose



Il y a forcément des pertes

L'Énergie et les transformations technologiques dans la révolution industrielle



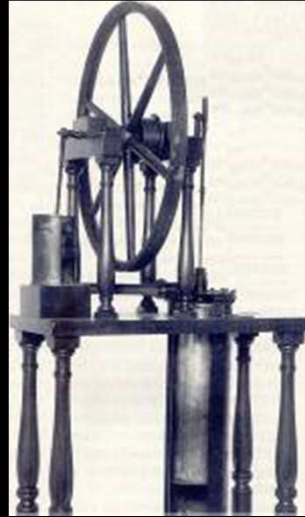
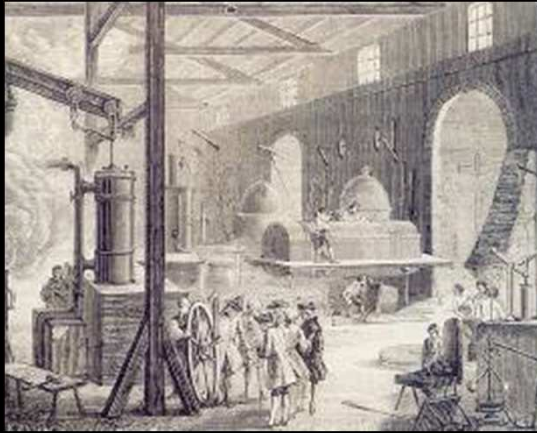
'Les premier et deuxième principe de la thermodynamique :

« La nature est à un casino bien peu recommandable. Non seulement vous ne pouvez jamais gagner (premier principe), mais vous perdez à tous les coups une partie de votre mise (Deuxième principe) ».

Hubert Reeves



L'Énergie et les transformations technologiques dans la révolution industrielle



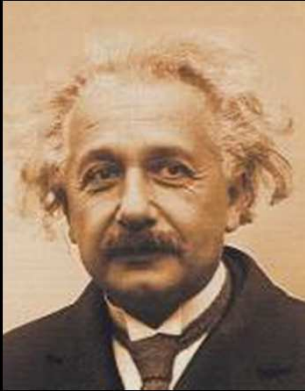
'Introduction de la notion d'entropie par Rudolf Clausius (1865)



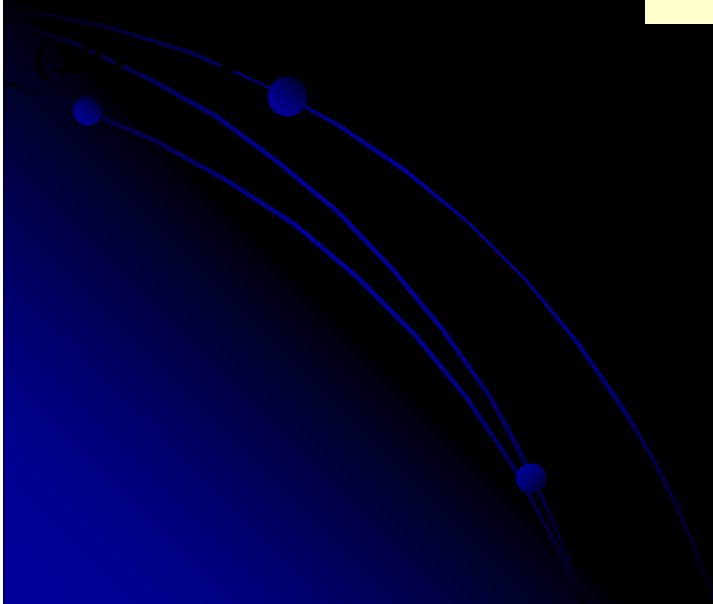
**Rudolf Julius
Emmanuel
Clausius
(1822-1888)**

**L'entropie est une mesure de la
valeur d'une énergie, de son
utilisabilité, mais, les proportions
sont inversées ; plus l'entropie est
élevée, moins l'énergie est
utilisable**

Contexte historique de l'énergie



$$E = m c^2$$



Contexte historique de l'énergie



Wilhelm Ostwald, 1880

‘Toujours dans leur histoire, l'énergie et la matière restent côte à côte, la matière étant le réservoir, le véhicule de l'énergie.’

1853 - 1932

Chimiste germano-balte

Energie et développement

- L'énergie est un élément majeur dans le développement de l'humanité. Rappelons-en brièvement les étapes de ce développement:
 - Première consommation énergétique est la nourriture. Elle lui permet de vivre et d'assurer ainsi sa descendance.
 - Il y a 500 000 ans environs, l'homme a découvert le feu. Celui-ci lui a fourni de la lumière pour voir la nuit, la chaleur pour lutter contre le froid et faire cuire les aliments.

Energie et développement (suite...)

- Il y a 7000 ans environs, l'homme a inventé le charbon de bois, ce qu'il lui permet de développer de nouvelles techniques: poterie, métallurgie du plomb et du cuivre, fabrication du plâtre et de la chaux...
- Il y a environs 3000 ans, l'homme a découvert la métallurgie du fer;
- Les premiers transports se sont fait à dos d'homme et d'animal, puis la voile, utilisant l'énergie du vent dans le transport maritime. Le charbon a permis d'utiliser les locomotives à vapeur et l'essence les voitures;

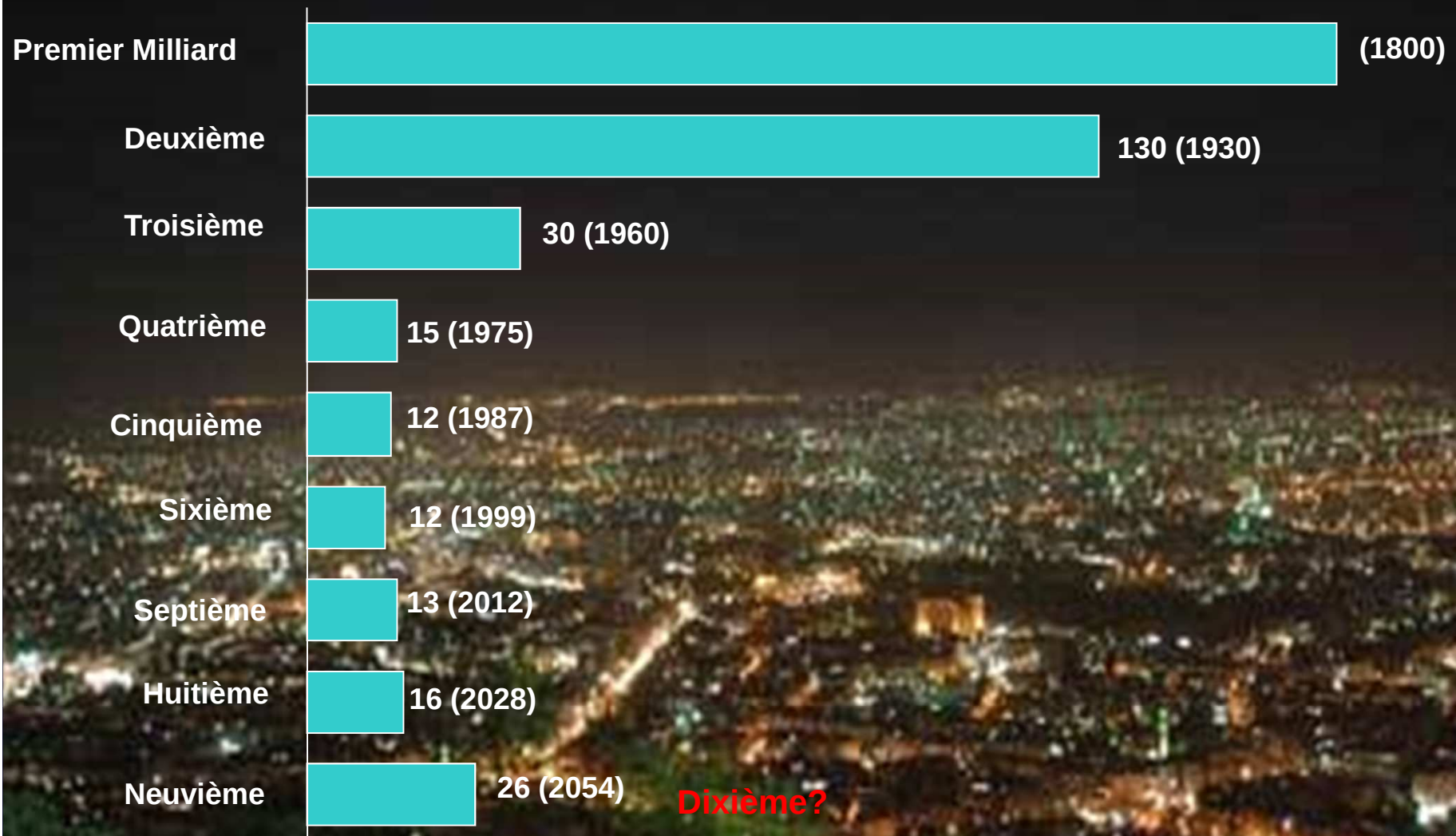
Energie et développement (suite...)

- La consommation énergétique a rapidement augmenté depuis l'ère industrielle, particulièrement au cours du 20^{ème} siècle. Le développement énergétique que nous vivons actuellement est singulièrement accéléré comparé à celui qu'ont vécu nos ancêtres lors des dernières millénaires;
- L'histoire de l'énergie est passée par une succession de **découvertes** qui ont progressivement permis d'améliorer la condition humaine jusqu'à celle que nous connaissons aujourd'hui;

Energie et développement (suite...)

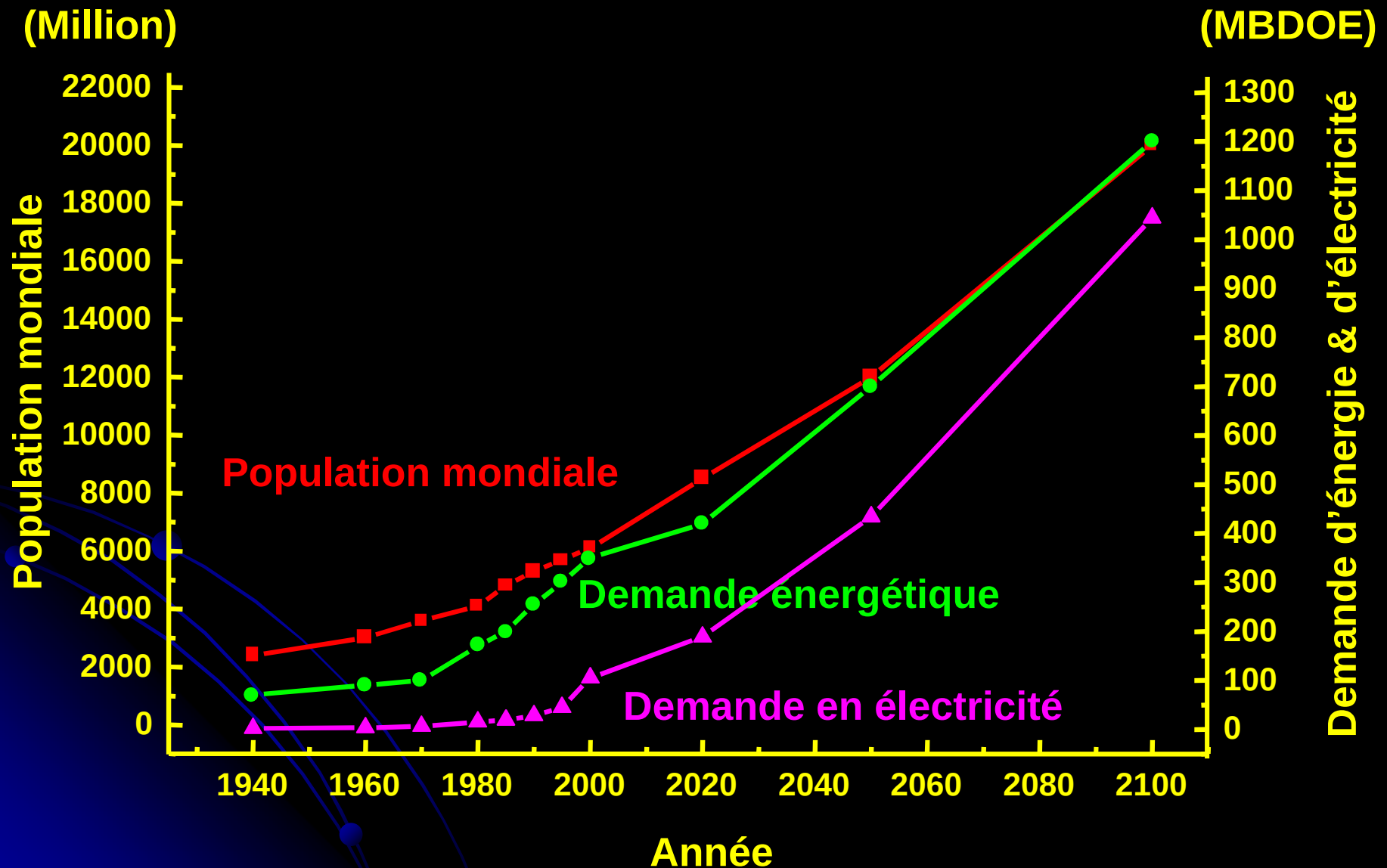
- On a ainsi constaté que l'énergie joue un rôle essentiel dans le développement économique, l'élément le plus spectaculaire du progrès étant sans doute l'augmentation d'un facteur supérieure à deux de l'espérance de vie en 200 ans;
- Deux facteurs concourent à une demande énergétique plus forte dans l'avenir: ce sont l'accroissement de la population mondiale et le fait que les pays en voie de développement souhaitent accroître leur niveau de vie.

Energie et démographie



La population mondiale à tendance à doubler tout les 60 ans, ce qui revient à un taux de croissance de 1,2 à 2% par année.

Energie et démographie



Démographie, la croissance

Population	Année		Croissance	Pourcentage
	1990	2020		
Amérique du Nord	276	326	50	1.8%
Amérique Latine	448	716	268	9.6%
Europe	454	489	35	1.3%
Europe Centrale	100	111	11	0.4%
Afrique du Nord et Moyen Orient	271	543	272	9.7%
Afrique Subsaharienne	502	1195	693	24.8%
Japon, Australie, Nouvelle Zélande	150	163	13	0.5%
Asie du sud	1146	1938	792	28.3%
Asie du Sud Est	1657	2265	608	21.7%
Total	5293	8090	2797	100%

Energie et démographie (suite)

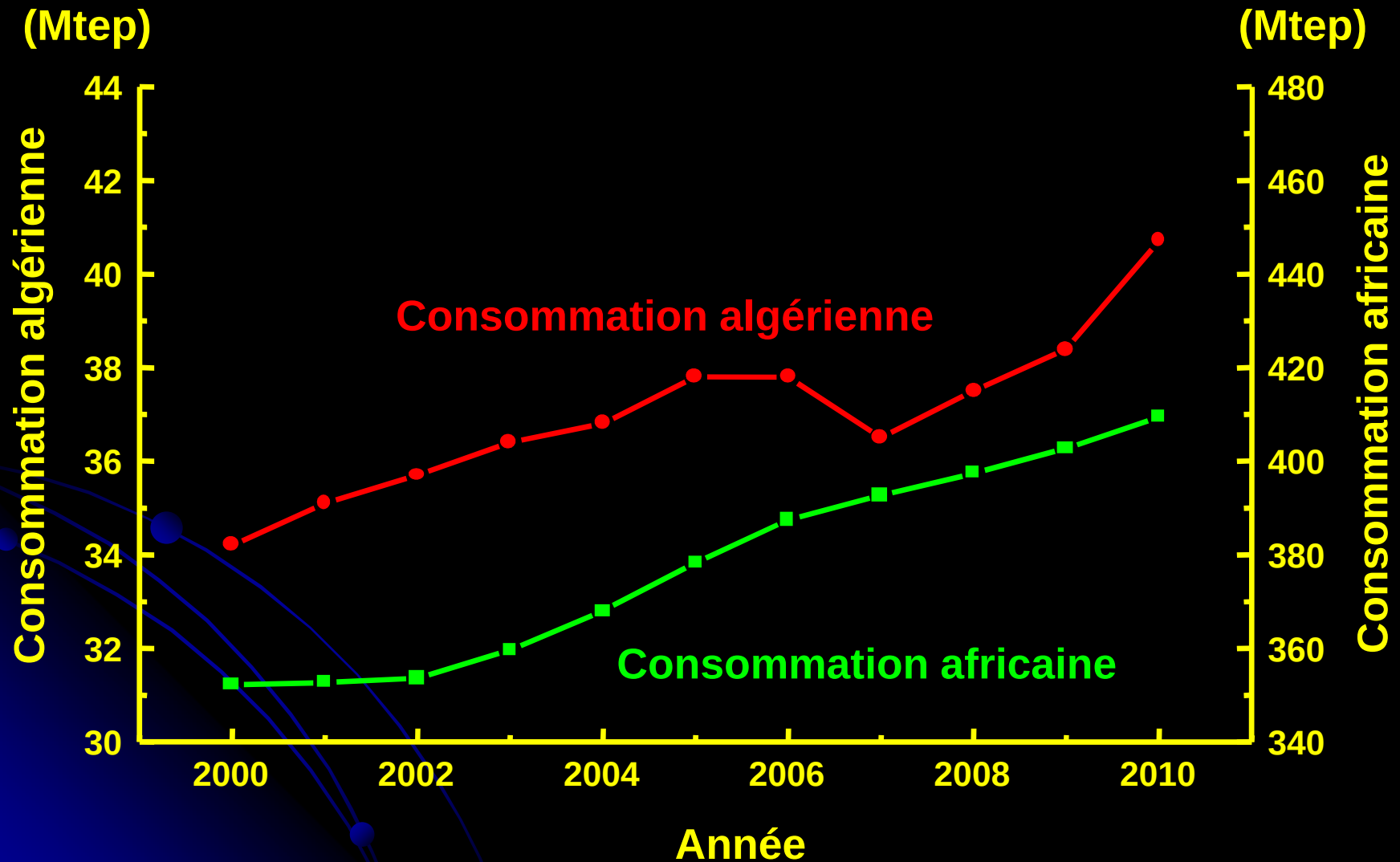
- On estime qu'il y avait 250 millions d'habitants sur terre en l'an un;
- Le premier milliard d'habitants a été atteint en 1820;
- La population double et atteint, en 1925, les 2 milliards d'habitants; 3 milliards d'habitants en 1961 et 4 milliards en 1976;
- Les 6 milliards d'habitants ont été atteints en l'an 2000;
- Un taux moyen de croissance d'environ 2%.

Energie et démographie (suite...)

- L'industrialisation a généré une amélioration des conditions de vie, ce qui a entraîné une augmentation de la consommation d'énergie;
- Depuis 1970 la consommation annuelle d'énergie primaire a pratiquement doublé pour passer de 5000 Mtep à 10500 Mtep (tonne équivalent pétrole) , et qu'il est prévu qu'elle atteigne 15000 Mtep en 2030 et jusqu'à 45000 Mtep, suivant les scénarios, en 2100.
- En 2000, la consommation mondiale d'énergie a été de 8,8 Gtep et 15000 TWh en électricité

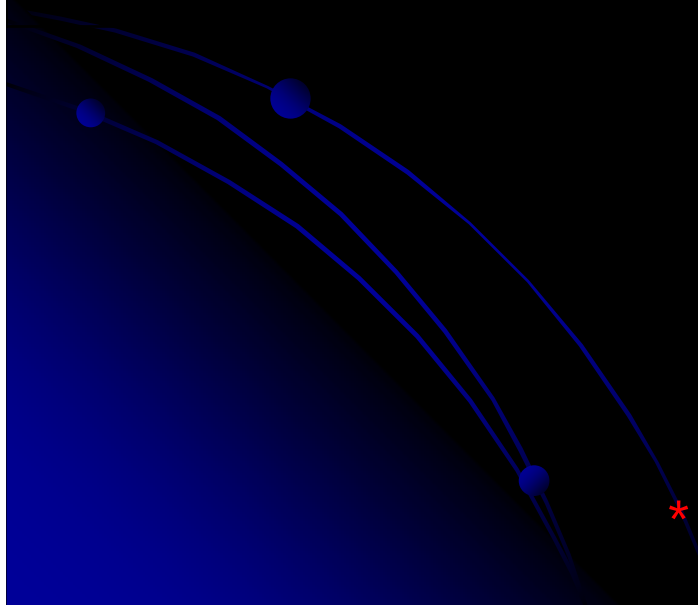
1 tep= 10^{10} calories $\cong$ 42 GJ, 1kWh= $3.6 \cdot 10^6$ J, 1tep= 11700 kWh.

Energie, l'Algérie & l'Afrique



Energie, l'Algérie & région arabe

	Production*		Consommation*	
Année	1980	2014	1980	2014
Algérie	2,8	82,08	0,8	19,31
Région arabe	46,82	179,57	6,27	89,59



* Quadrillion (10^{15}) British thermal unit (1055, 54 J)

Energie & l'avenir

- 250,000 enfants naissent chaque jour sur terre. Les démographes prévoient, s'il n'y a pas de catastrophe, que la population de la terre sera de 8 milliards vers 2020-2025 et de 12-20 milliards en 2100;
- Cette augmentation de la population va accroître la demande énergétique;
- En prenant une croissance énergétique de 2% par an, cela revient à doubler la consommation énergétique de la planète à l'horizon 2030.

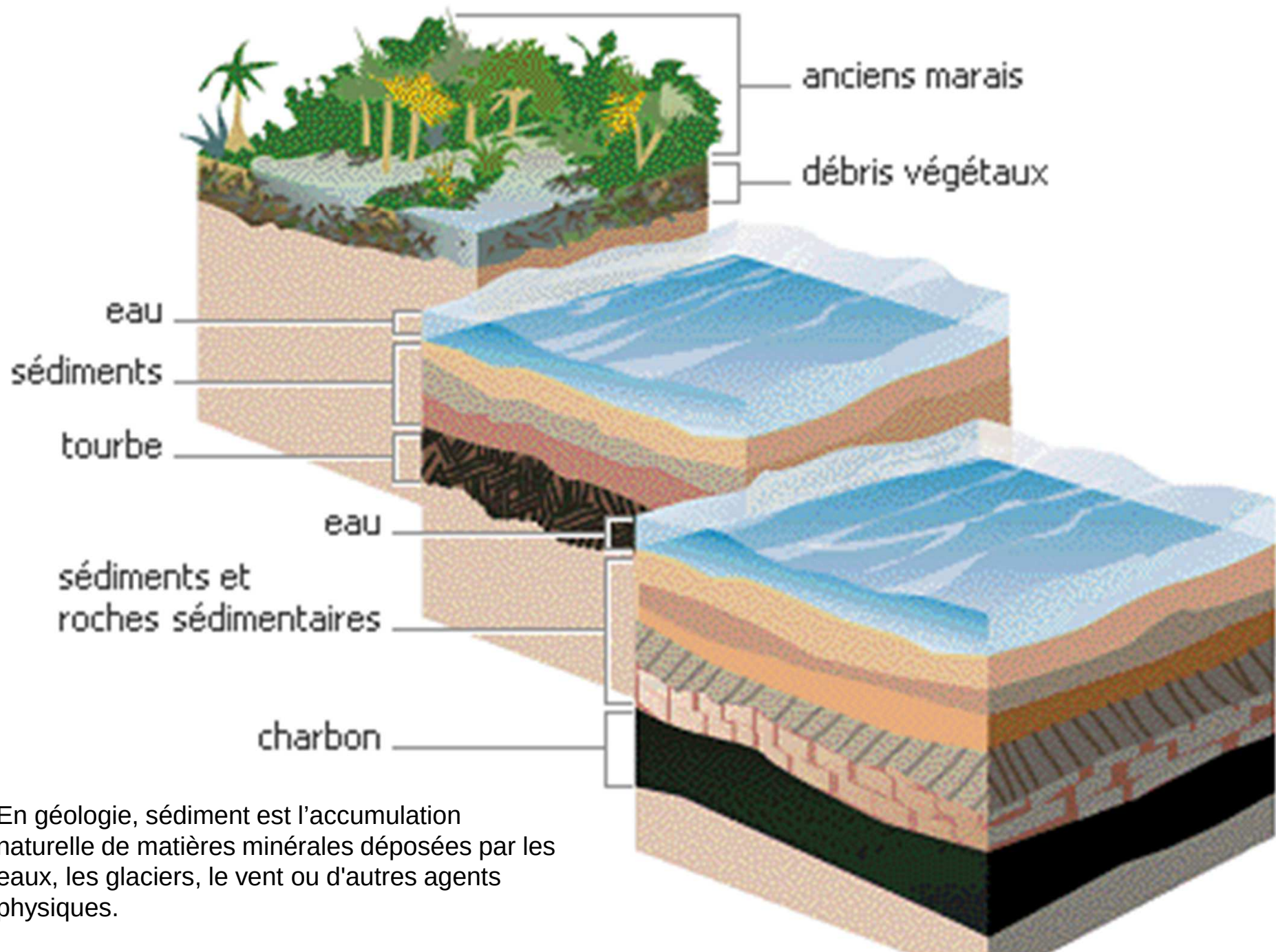
Energie fossiles

- Les énergie fossiles, qui comprennent :
 - le charbon,
 - le pétrole et
 - le gaz,
- sont issues de la matière vivante, végétale ou animale. Elles contiennent du carbone dont la combustion fournit de l'énergie et génère du gaz carbonique.



Le charbon

- Le charbon s'est formé à l'époque du Carbonifère, période qui va de -345 à -280 millions d'années, à partir de végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversement géologiques importants. Les végétaux se sont développés grâce à l'énergie solaire et le charbon a permis de stocker cette énergie. Ils se sont lentement décomposés à l'abri de l'air pour aboutir au minerai de charbon;



Le charbon (suite)

- Plusieurs qualités de charbon sont disponibles dont:
 - l'Anthracite (90-95% de carbone),
 - la Houille (70-90% de carbone),
 - la Tourbe (60% de carbone)
 - le Lignite (38% de carbone, 43% d'eau) et
 - les Flambants (20% de carbone).

Le pétrole

- Le pétrole s'est formé à partir du plancton qui s'est déposé au fond des mers. Les matières organiques, mélangées aux sédiments, se sont accumulées en couches déposées à grande profondeur. Dans les eaux pauvres en oxygène, les matières organiques piégées se sont transformées, sous l'action de micro-organismes anaérobies, en macromolécules carbonées, le kérogène. Sous l'effet de la pression et de la température, le kérogène a subi un craquage thermique qui a éliminé l'azote et l'oxygène pour laisser des composés à carbone et à l'hydrogène, le pétrole brut.

Le gaz

- Le gaz s'est formé en même temps que le pétrole mais il migre plus facilement que lui.
- Le gaz naturel, mélange d'hydrocarbures saturés gazeux de même origine que le pétrole.
- D'un point de vue énergétique, 1 000 m³ de gaz naturel sont équivalents à une tonne de pétrole.
- La composition du gaz naturel est très variable selon les régions où il s'est formé. Par exemple, quelques gisements contiennent du sulfure d'hydrogène, composé gazeux qu'il faut éliminer.

Le gaz (suite)

- L'industrie du gaz naturel est née au 19^{ième} siècle au USA. La première exploitation vit le jour en 1821;
- L'exploitation du gaz naturel commence généralement par une extraction en phase liquide du butane, du propane et des essences naturelles. Le gaz résiduel, appelé gaz sec, est constitué principalement de méthane (70 à 95% en volume) et d'éthane. Le gaz sec est principalement utilisé pour le chauffage ou comme carburant, mais il sert également de base pour la fabrication de matières plastiques ou de produits pharmaceutiques.

Le gaz (suite)

- On peut stocker le gaz sous une pression comprise entre 40 et 270 bars;
- Le gaz naturel est une source de combustibles actuellement en constant développement par les pays producteurs de gaz dont l'Algérie;
- L'utilisation du gaz est aussi en plein développement et l'on peut penser que cette croissance se poursuivra.

Réserve mondiale de charbon

Région	Réserve (Gt)	%
Amérique du Nord	116,6	22,9%
Amérique du Sud et Centrale	7,8	1,6%
Europe	41,6	8,2%
ex URSS	97,4	19,1%
Moyen-Orient + Afrique	61,3	12,0%
Asie Pacifique	184,4	36,2%
Total	509,1	100%

Réserve mondiale de pétrole

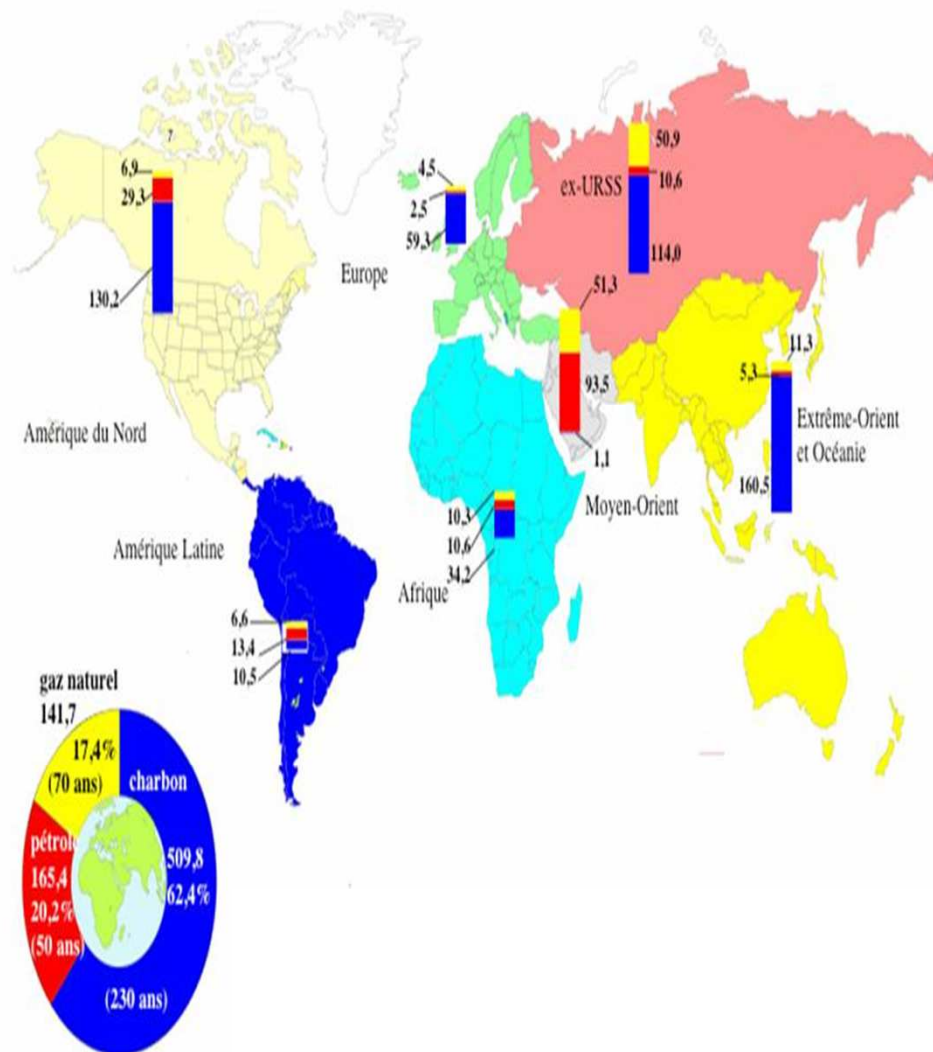
Région	Réserve (Gt)	%
Amérique du Nord	8,5	6,1%
Amérique du Sud et Centrale	13,6	9,0%
Europe	2,5	1,9%
ex URSS	9,0	6,4%
Moyen-Orient	92,5	65,3%
Afrique	10,0	7,1%
Asie Pacifique	6,0	4,2%
Total	142,1	100%

Réserve mondiale de Gaz

Région	Réserve (10 ¹² m ³)	%
Amérique du Nord	7,33	4,9%
Amérique du Sud et Centrale	6,93	4,6%
Europe	5,22	3,5%
ex URSS	56,70	37,8%
Moyen-Orient	52,52	35,0%
Afrique	11,16	7,4%
Asie Pacifique	10,33	6,8%
Total	150,19	100%

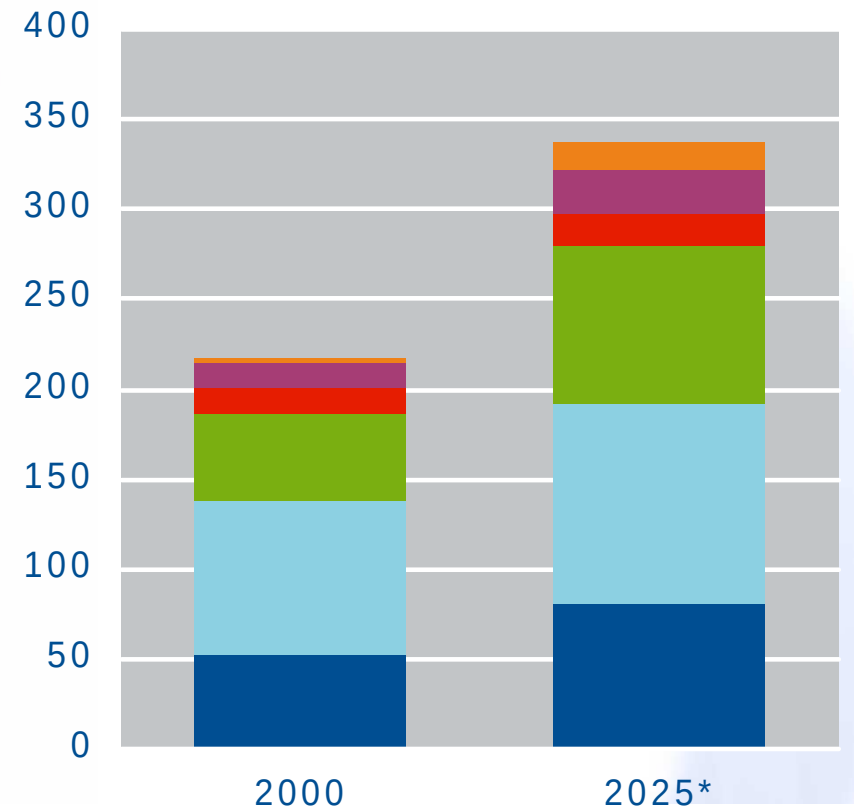
Réserves énergétiques mondiales

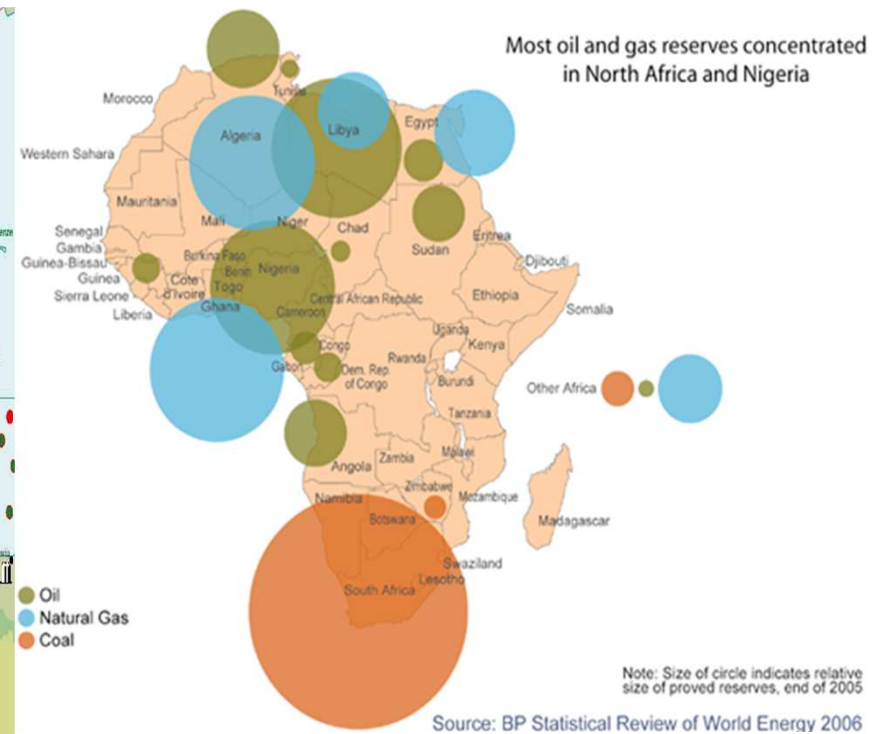
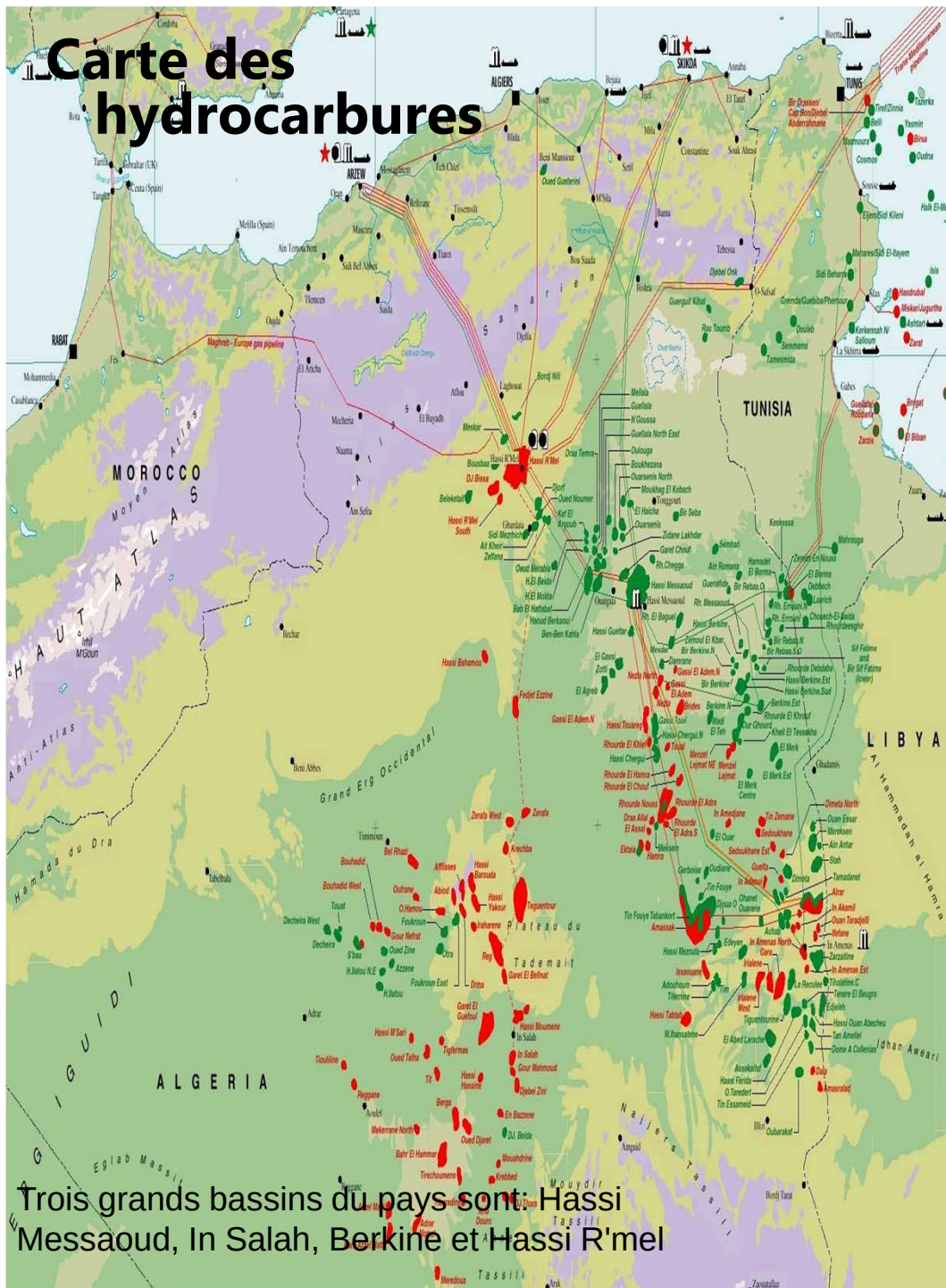
Unité : Milliard de tep



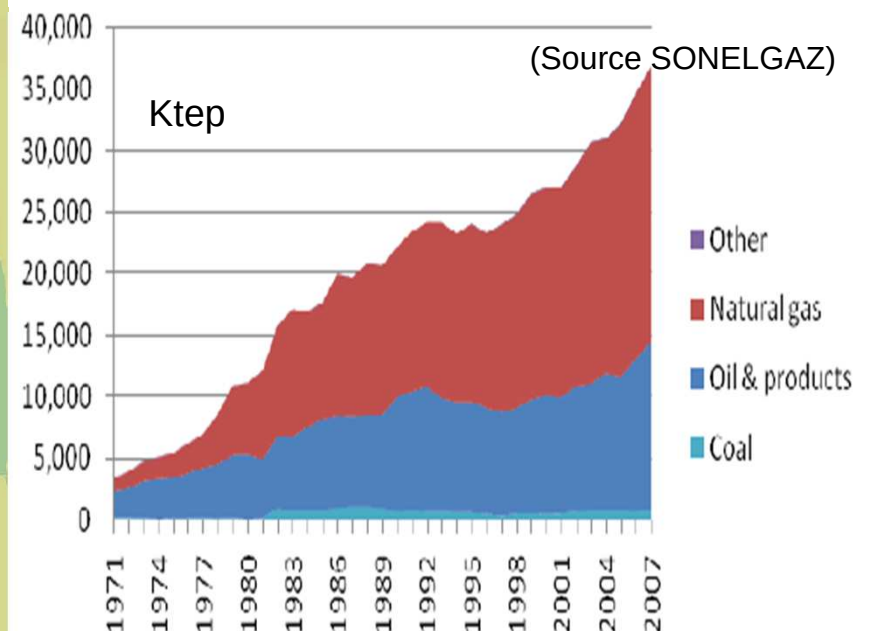
CHANGEMENT ENERGIE MIX

Million barils d'équivalent de pétrole/jour





Consommation d'énergie primaire algérien



Consommation

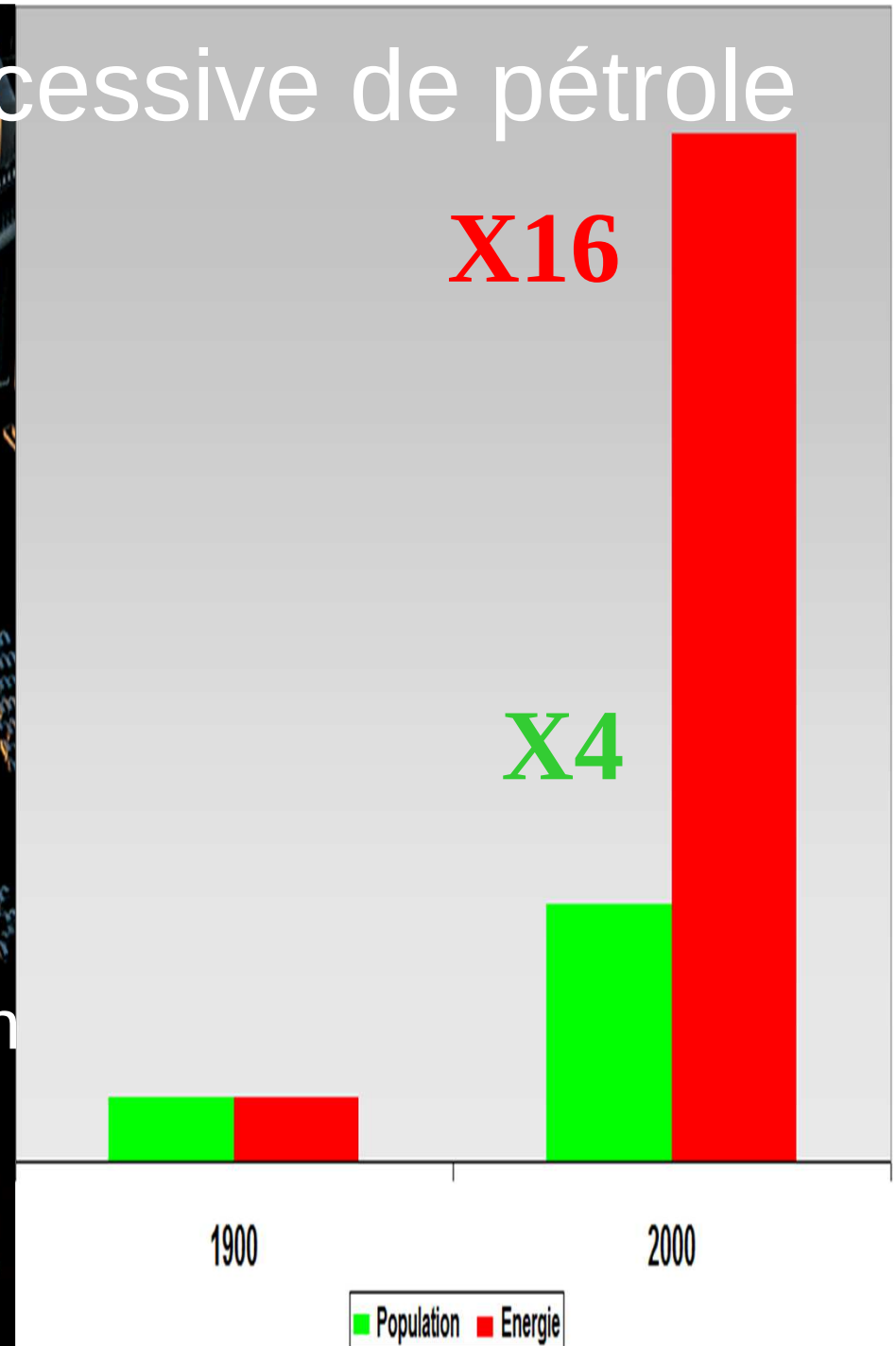
- Entre le début et la fin du 20^{ième} siècle la consommation d'énergie primaire mondiale est passée d'environ un Gtep à une dizaine de Gtep. C'est grâce à cela que l'humanité a pu assurer son développement économique;
- En 2004, la production d'énergie est assurée très majoritairement à partir de combustible fossiles (84%);
- A ce niveau, nous pouvons conclure que les besoins croissants en énergie ne pourront être que provisoirement satisfaits par les combustibles fossiles (un siècle au grand max.)

Consommation excessive de pétrole

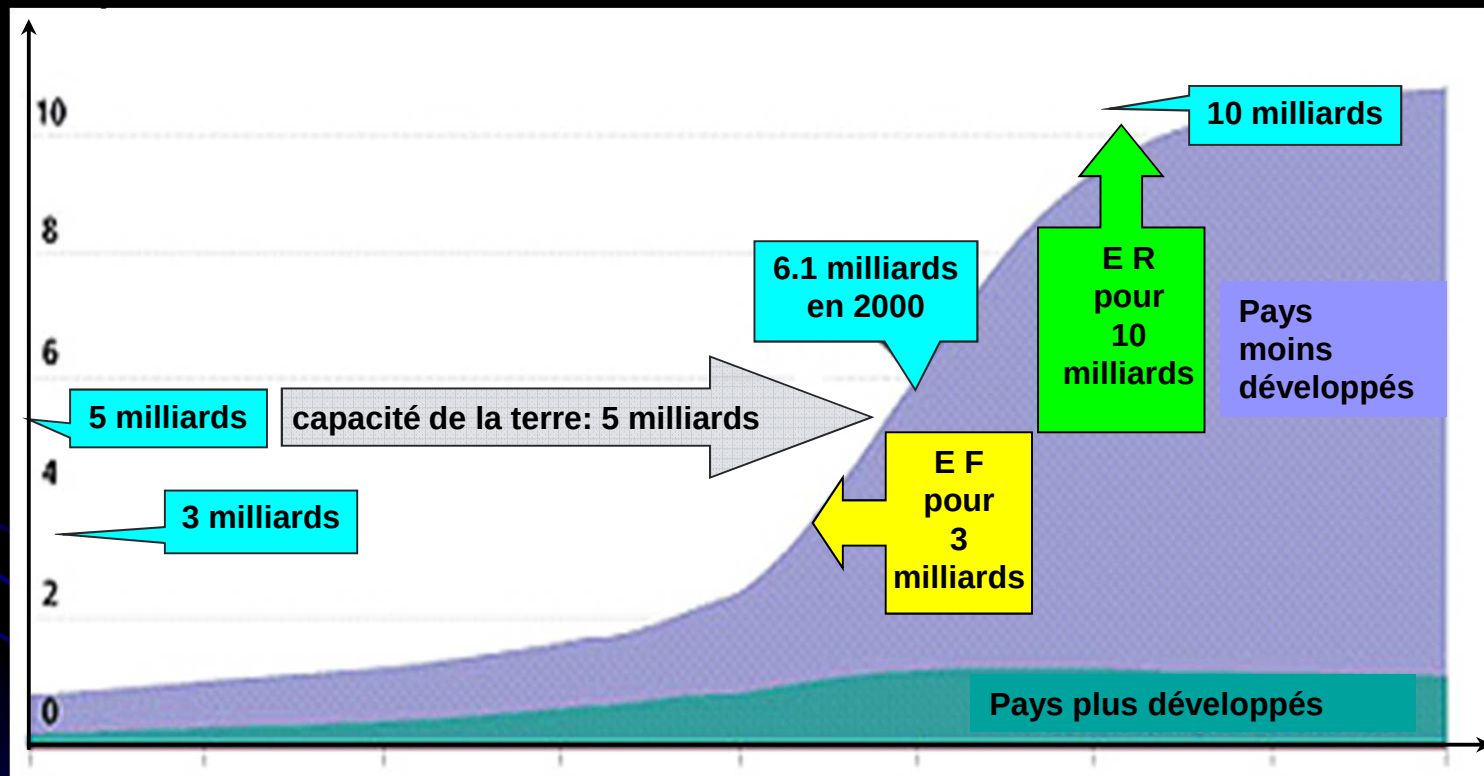
X16

X4

On consomme aujourd'hui en quatre semaines le pétrole que l'on consommait en un an en 1950

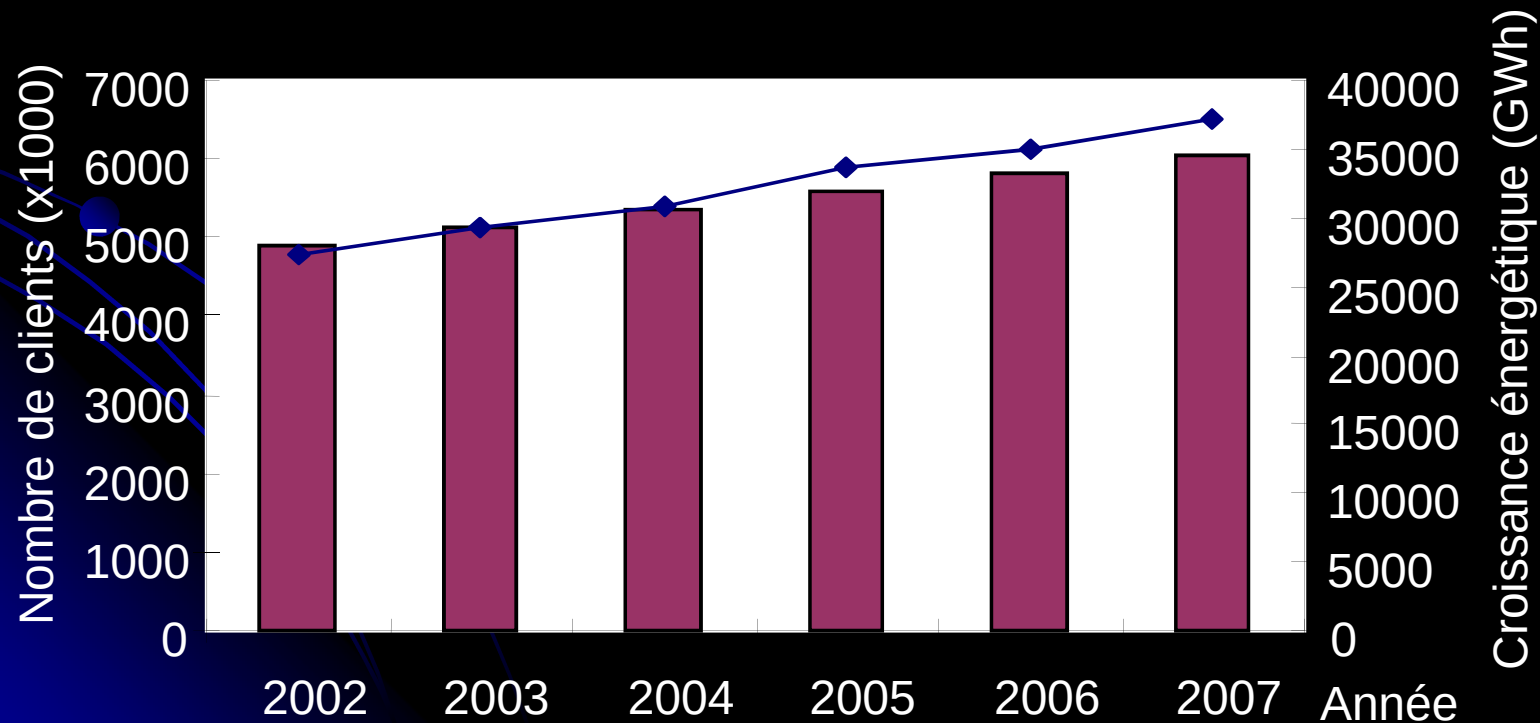
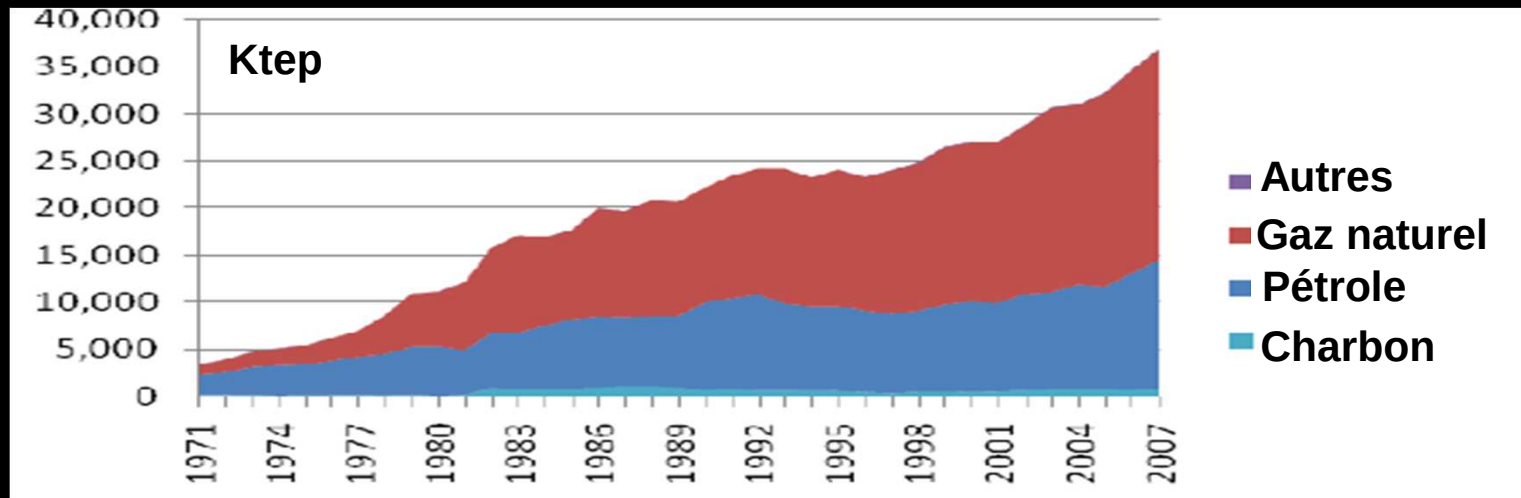


Démographie, la croissance et capacité de la terre

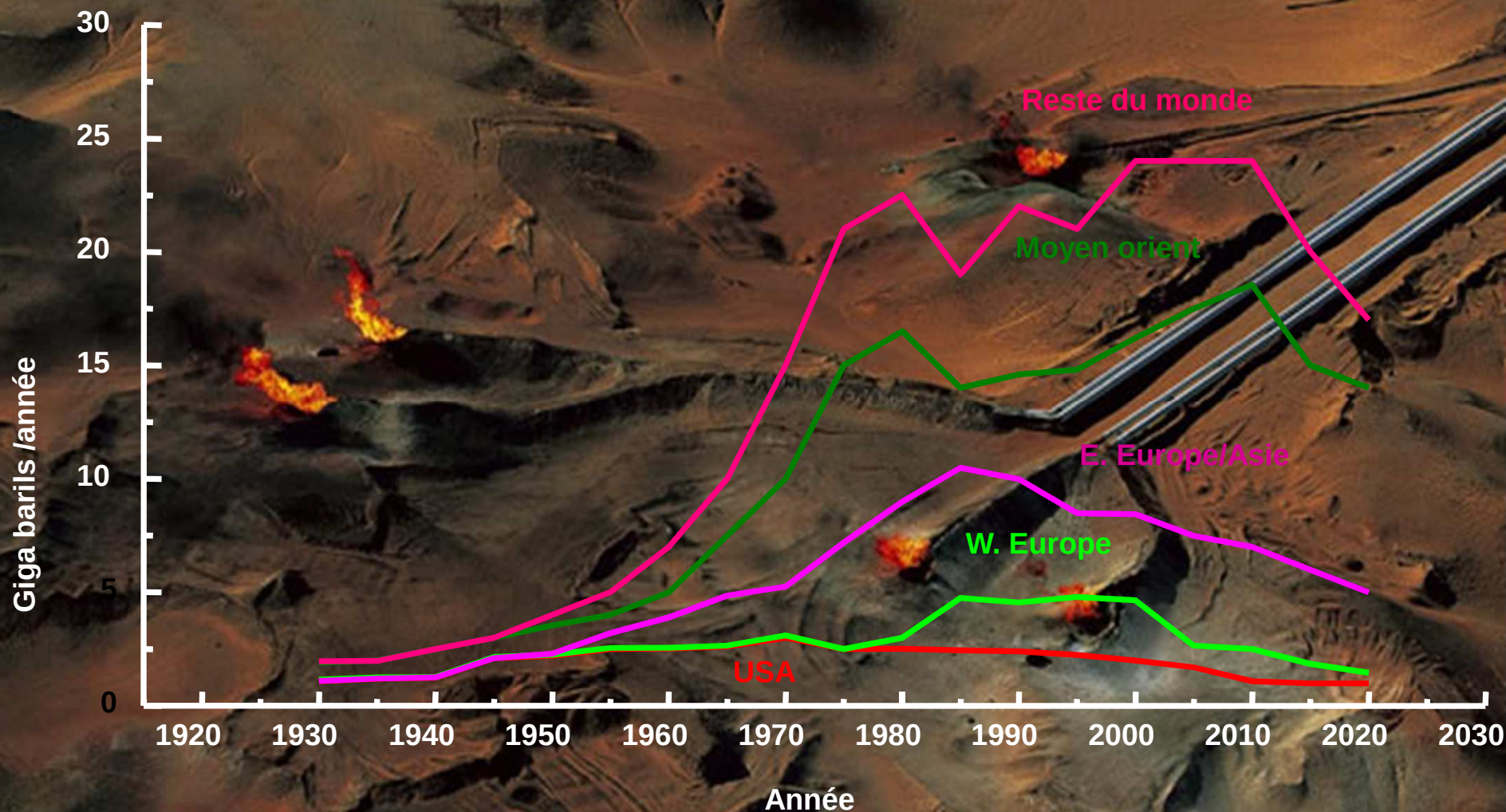


Consommation Algérienne en énergie

(Source SONELGAZ, 2007)

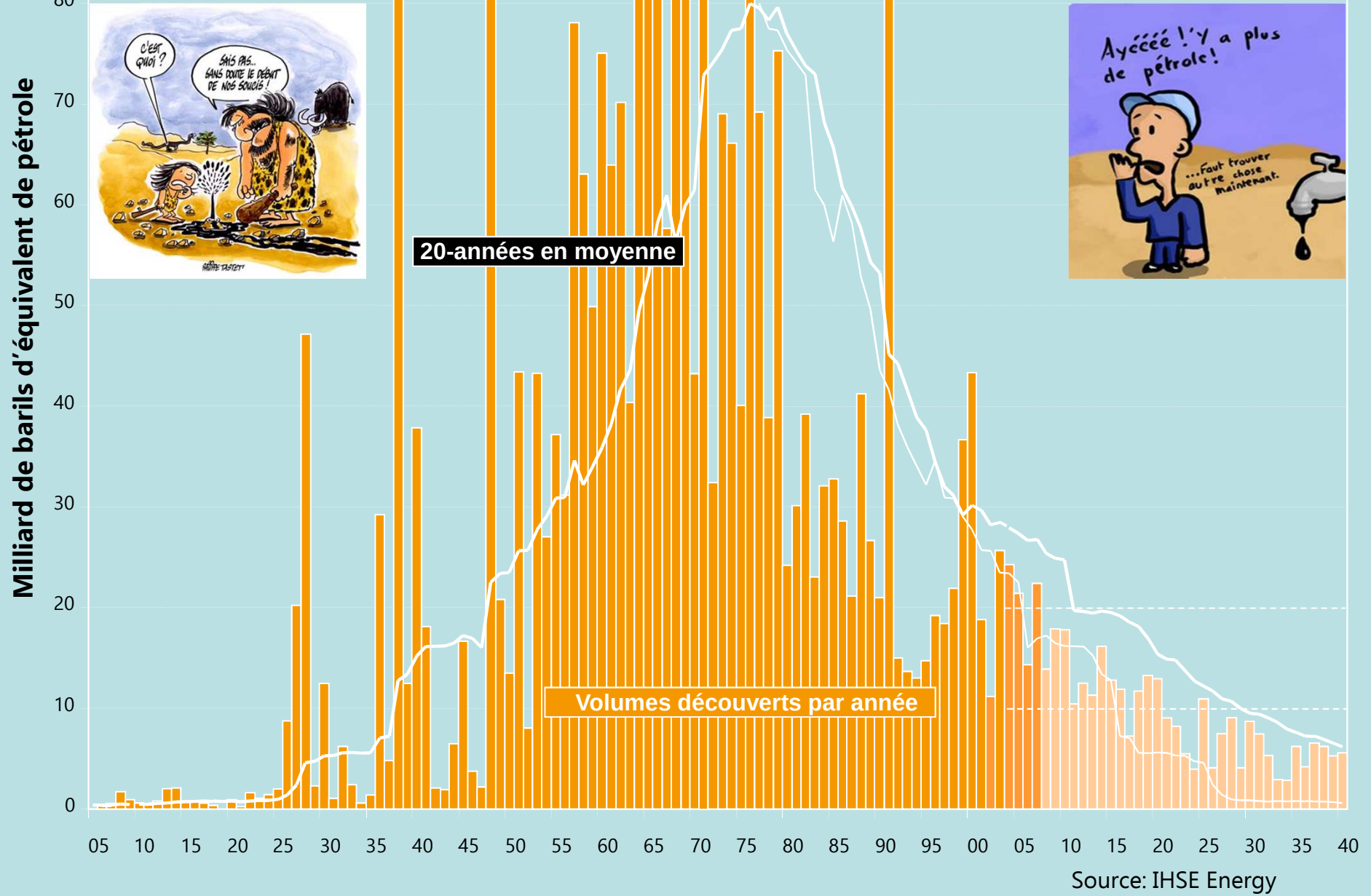


Déclin des réserves de pétrole

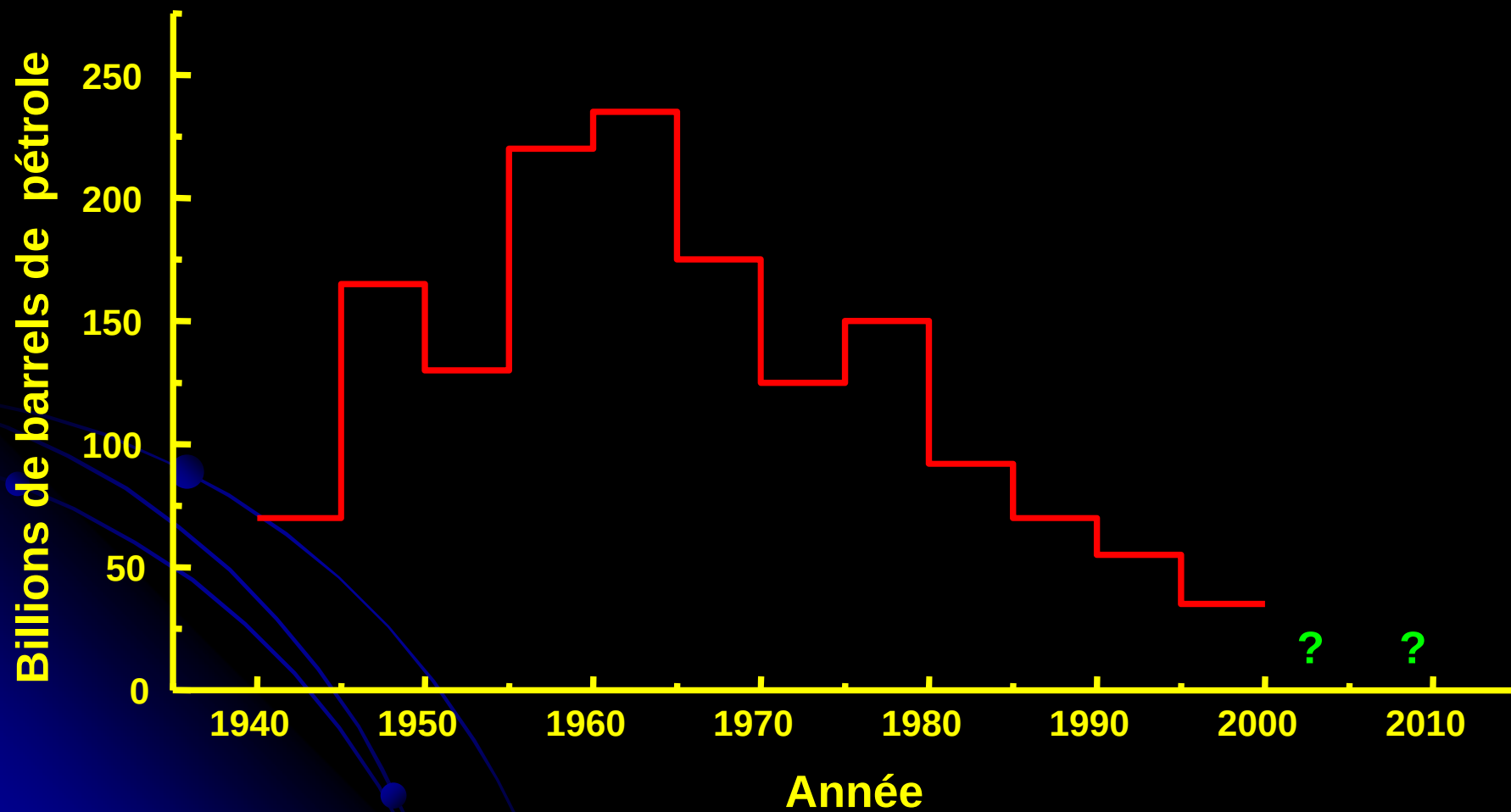


Les combustibles fossiles sont en quantité finie sur terre, ce qui pose le problème de leur raréfaction prochaine

Déclin des réserves de pétrole (1905-2040)



Déclin des nouvelles découvertes de réserves de pétrole



Consommation électrique, l'exemple

Somalie = 300 kWh

Jordanie = 1500 kWh

Inde = 3000 kWh

Algérie = 3000 kWh

Chine = 3500 kWh

U.K = 10 000 kWh

Allemagne = 10 000 kWh

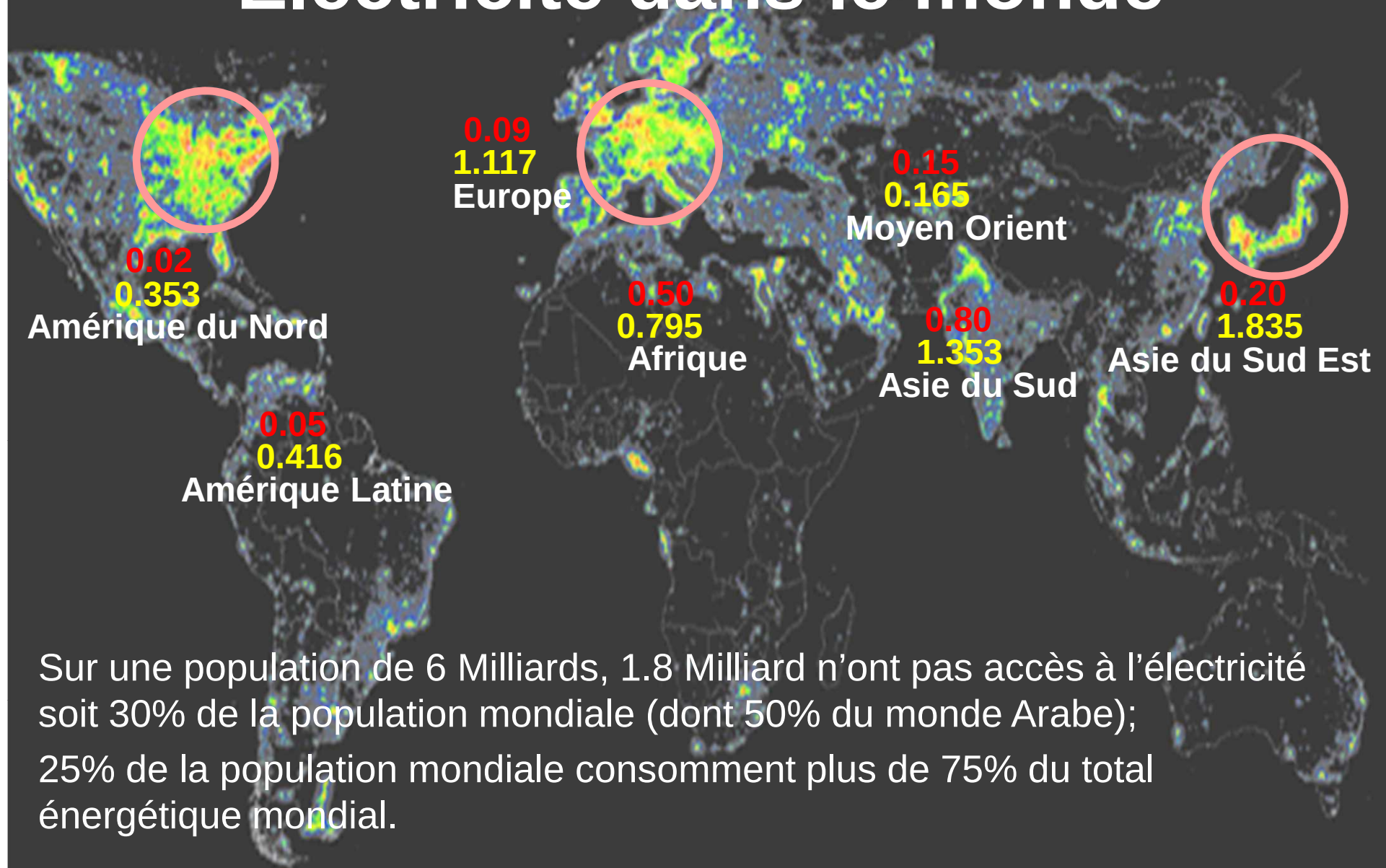
U.S.A = 15 000 kWh

U.A.E = 18 000 kWh

Kuweit = 18 000 kWh

Norvège = 44 000 kWh

Électricité dans le monde



Sur une population de 6 Milliards, 1.8 Milliard n'ont pas accès à l'électricité soit 30% de la population mondiale (dont 50% du monde Arabe); 25% de la population mondiale consomment plus de 75% du total énergétique mondial.



3 régions fortement industrialisées

Energie fissile ou nucléaire

La combustion du pétrole, du charbon ou du gaz est une réaction chimique qui dégage de la chaleur. Elle correspond à une réorganisation du cortège électronique des atomes. L'énergie libérée pour une réaction élémentaire, i.e. mettant en œuvre uniquement les atomes nécessaires pour la réaliser, se mesure en électron volt (eV, $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$).

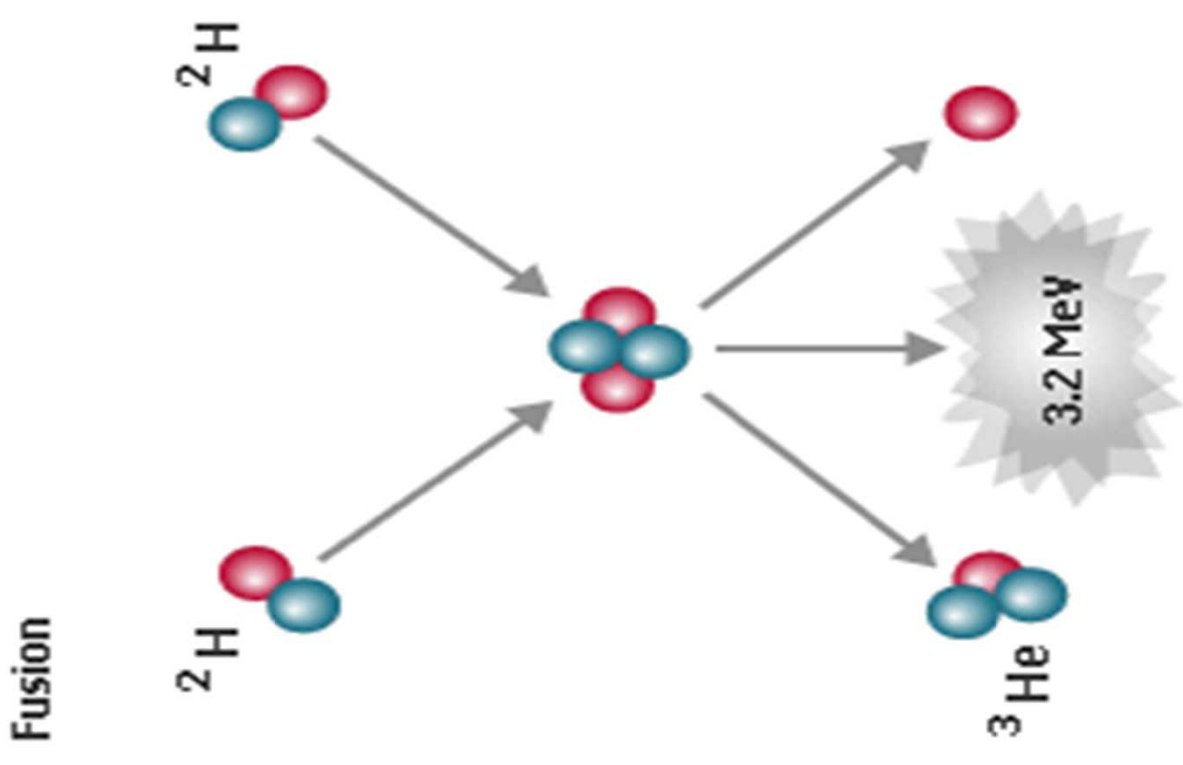
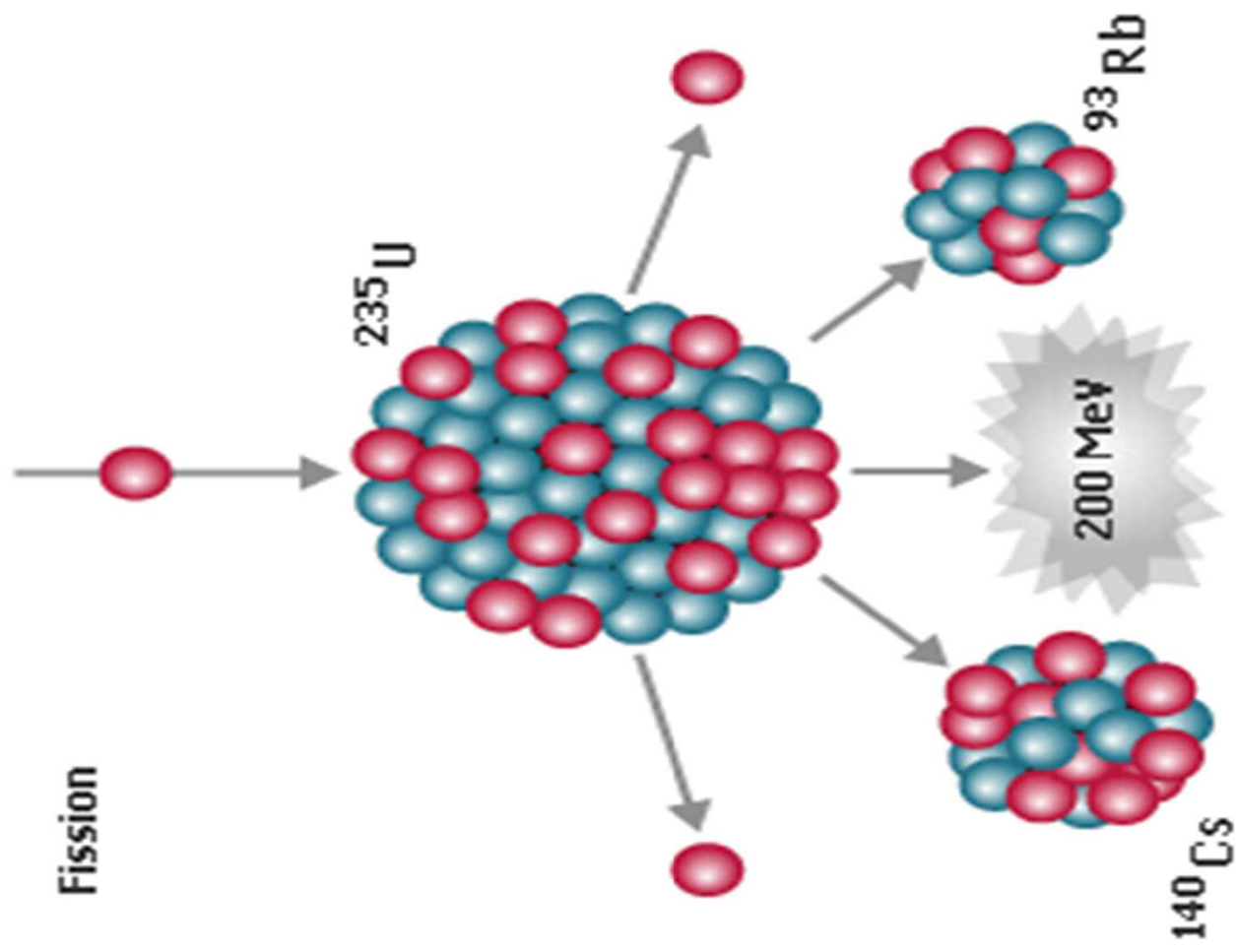
Un atome est constitué d'électrons et d'un noyau composé de nucléons. Les réactions nucléaires correspondent à une réorganisation des nucléons dans les noyaux qui interagissent. Certaines d'entre elles dégagent de l'énergie.

Energie nucléaire (suite...)

C'est le cas de la fission de quelques noyaux. L'énergie libérée est, à masse égale, plus d'un million de fois plus grande que celle d'une réaction chimique: elle se chiffre en MeV, i.e. en million, d'électron volts. L'énergie nucléaire permet de produire des quantités considérables d'énergie à un coût très compétitif par rapport aux autres sources.

Cette énorme concentration d'énergie a une conséquence importante : les déchets seront, en volume, plus d'un million de fois plus concentrés que ceux issus d'une réaction chimique. Certains d'entre eux sont dangereux pour l'humanité, mais leur faible volume permet d'avoir des solutions pour leur stockage ou entreposage.

Neutron Proton



Energie nucléaire (suite...)

Découverte en 1938 par Hahn et Strassmann, la fission nucléaire est la division d'un noyau atomique en plusieurs fragments, sous l'impact d'une particule (généralement un neutron), alors que la fusion nucléaire est la réunion de plusieurs noyaux atomiques en un seul. Ces deux types de réactions libèrent d'importantes quantités d'énergie. Sur le schéma de droite, la fusion de deux noyaux de deutérium conduit à la formation d'un noyau d'hélium ${}^3\text{He}$, avec émission de 3,2 MeV d'énergie et d'un neutron (noté n).

La Fission

Certains noyaux lourds se brisent spontanément en deux fragments de masse moyenne accompagnés de neutrons, tandis que d'autres le font après avoir absorbé un neutron. C'est le phénomène de la fission. Ainsi l' ^{235}U , qui est un isotope de l'uranium composé de 92 protons et de 143 neutrons, a une grande probabilité de capturer un neutron dont la vitesse correspond à l'agitation thermique du milieu. Ces neutrons se propagent, à 20°C , à une vitesse de 2,2 Km/s, ce qui correspond à une énergie cinétique moyenne de 1/40 eV. Le noyau d' ^{236}U formé est excité ($^{236}\text{U}^*$). Il se casse en deux morceaux de masse moyenne (appelés fragment de fission) et, selon les cas, deux ou trois neutrons sont émis.

La Fission (suite...)

L'énergie libérée est environ 200 MeV soit 30 pico-joules :



Chaque neutron emporte une énergie cinétique moyenne de 2 MeV. Les neutrons émis sont rapides: leur vitesse est d'environ 20 000 Km/s. La somme des énergies cinétiques des fragments de fission est de l'ordre de 165 MeV. Les rayons γ et les antineutrinos emportent chacun une douzaine de MeV, et les électrons (β) 8 MeV.

Les réacteurs nucléaires

Un réacteur nucléaire est un système dans lequel on entretient une réaction en chaîne de fission par des neutrons. Les premiers réacteurs nucléaires n'ont pas été créés par l'homme mais par la nature. Cette conclusion a été établie en 1972 après qu'un laboratoire du CEA eut trouvé des échantillons d'uranium naturel, en provenance du gisement d'uranium d'Oklo au Gabon, dont la teneur en ^{235}U était inférieure aux 0,7% habituellement observés. La période radioactive de l' ^{238}U est de 4,5 milliards d'année et celle de l' ^{235}U de 700 millions d'années. Il y a 2 milliards d'années, la concentration isotopique de l' ^{235}U était de l'ordre de 3,6%.

Les réacteurs nucléaires (suite...)

Les réacteurs électrogènes permettent de produire de l'électricité. Leur intérêt est de pouvoir fournir de grosses quantités de chaleur à faible coût. Cette chaleur est utilisée pour produire de la vapeur qui actionne un groupe turboalternateur analogue à celui qui fonctionne dans les centrales classiques brûlant des combustibles fossiles.

Le premier réacteur nucléaire, d'une puissance de 0,5 Watt, a été réalisé par E. Fermi et son équipe en 1942 sous les tribunes d'un stade de Chicago. De l'électricité a été produite pour la première fois en 1951 et les premiers réacteurs électrogènes commerciaux sont apparus dans le milieu des années 1950.

Le combustible

Le seul noyau fissile existant dans la nature est l' ^{235}U , qui représente 0,7% de l'uranium naturel. L' ^{238}U , présent à 99,3%, est fertile, i.e. qu'il peut être transformé en noyau fissile, le ^{239}Pu , après capture d'un neutron et double désintégration β . Le couple U/Pu forme ce que l'on appelle le cycle uranium-plutonium qui est industriellement exploité. Le thorium pourrait l'être et ses réserves sont environ quatre fois plus importantes que celles de l'uranium. Toutefois, le ^{232}Th présent dans la nature n'est pas fissile mais fertile. Après capture d'un neutron, il conduit à l' ^{233}U . Le cycle thorium-uranium pourra être utilisé lorsqu'il n'y aura plus d'uranium économiquement exploitable.

Production d'électricité

Pour des raisons d'indépendance énergétique, économique et de sécurité d'approvisionnement, plusieurs pays du monde se sont lancés, après le premier choc pétrolier, dans un vaste programme de construction de centrales nucléaires, afin de répondre à la demande croissante d'électricité. La puissance installée, au niveau mondiale, est passée de 21,3 GW_e en 1970 à 357 GW_e en 2000, 632 GW_e en 2004 et 841GW_e en 2007 et 2037 GWe en 2014.

Le coût d'investissement d'une centrale est de l'ordre de 1700 €/kW_e et la durée de vie devrait atteindre 40 ans voir 60 ans de production continue. Le coût du kWh produit dépend de la gestion du parc nucléaire, en général le prix est de l'ordre de 0,03 à 0.10 €.

Les déchets

Toutes activité industrielle génère des déchets et le nucléaire n'échappe pas à cette règle. Il y a production d'environ 1 kg de déchet radioactif par habitant et par an en France, par exemple. Sur ce kilogramme, 990 g atteindront le niveau de la radioactivité naturelle dans moins de 30 ans mais 10 grammes garderont une radiotoxicité élevée pendant très longtemps. C'est de ces dernières qu'il faut particulièrement se préoccuper. Un déchet radioactif est toute matière dont on ne prévoit pas d'utilisation ultérieure et dont le niveau de radioactivité ne permet pas un rejet direct dans l'environnement.

Les réserves d'uranium

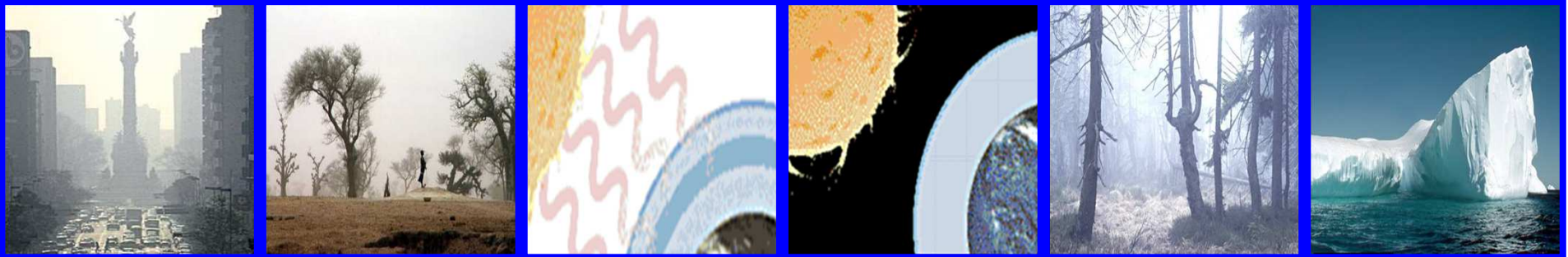
Le montant des réserves dépend du prix que l'on souhaite consentir pour les récupérer. Il y a actuellement des stock considérables d'uranium dans les pays occidentaux et dans l'Ex URSS, ce qui fait baisser les prix et ralentit les prospections minières. Le prix de l'uranium est passé de 42,9 \$/kg en Juillet 1996 à 26,52 \$/kg en 1998. La consommation annuelle mondiale est de l'ordre de 60 000 tonnes et la Cogéma, une société française, contrôle 20% du marché mondiale de l'uranium naturel.

Situation environnementale globale

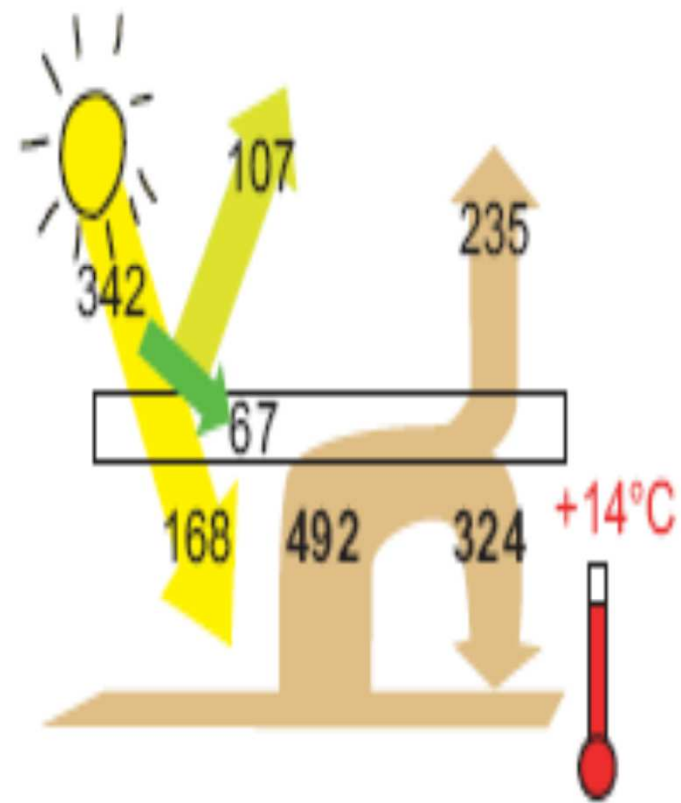
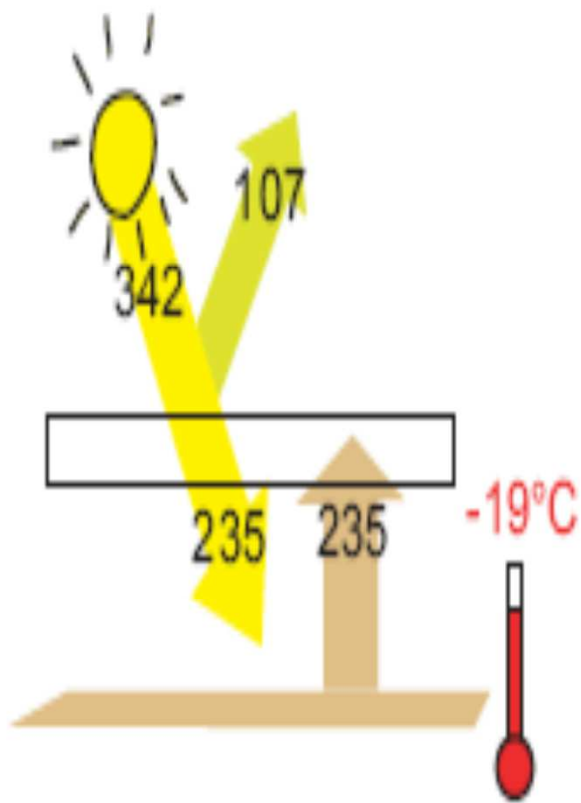


Situation environnementale globale (suite)

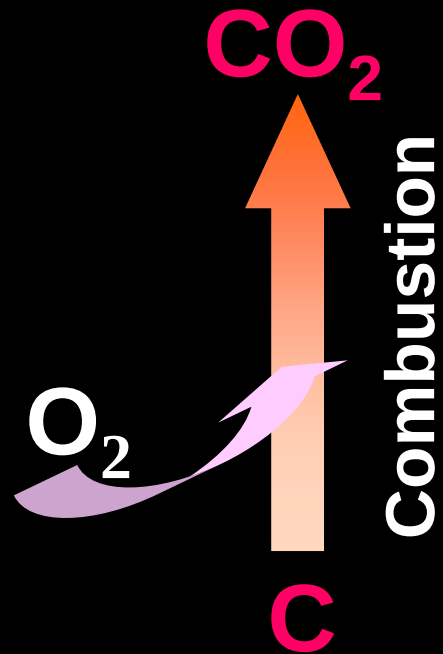
- Emission de CO_2 , CO , SO_2 , NO_x et autres polluants organiques avec conséquences prévisibles :
 - sécheresse entraînant une modification de la végétation et pouvant conduire à la désertification de certaines zones,
 - fonte des glaciers et rehaussement du niveau des mers entraînant l'immersion de régions côtières habitées...
- Pollution atmosphérique et pluies acide
- Déplétion de la couche d'ozone
- Risque des accidents nucléaires à large étendu
- Longue vie des déchets nucléaires...



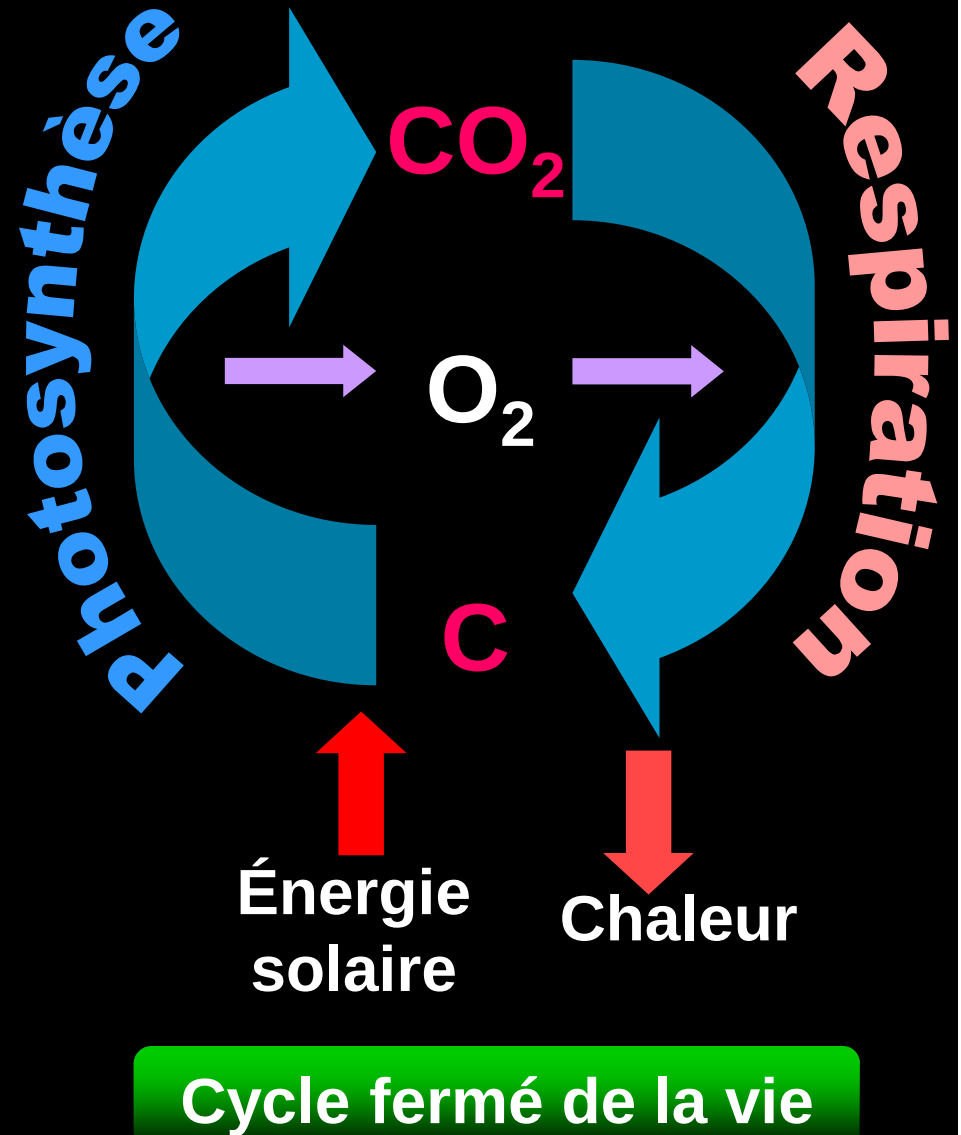
Flux d'énergie en W/m^2 sans et avec gaz à effet de serre (GES)



Source : d'après GIEC, 4^e rapport du 1^{er} groupe de travail, 2007.



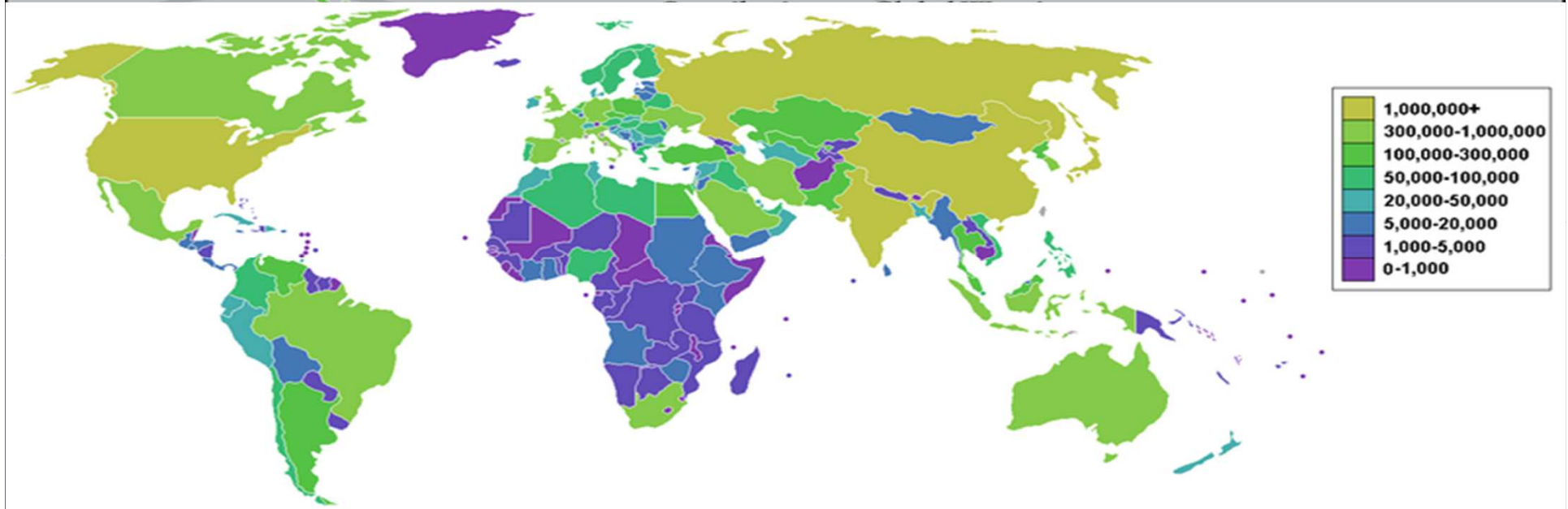
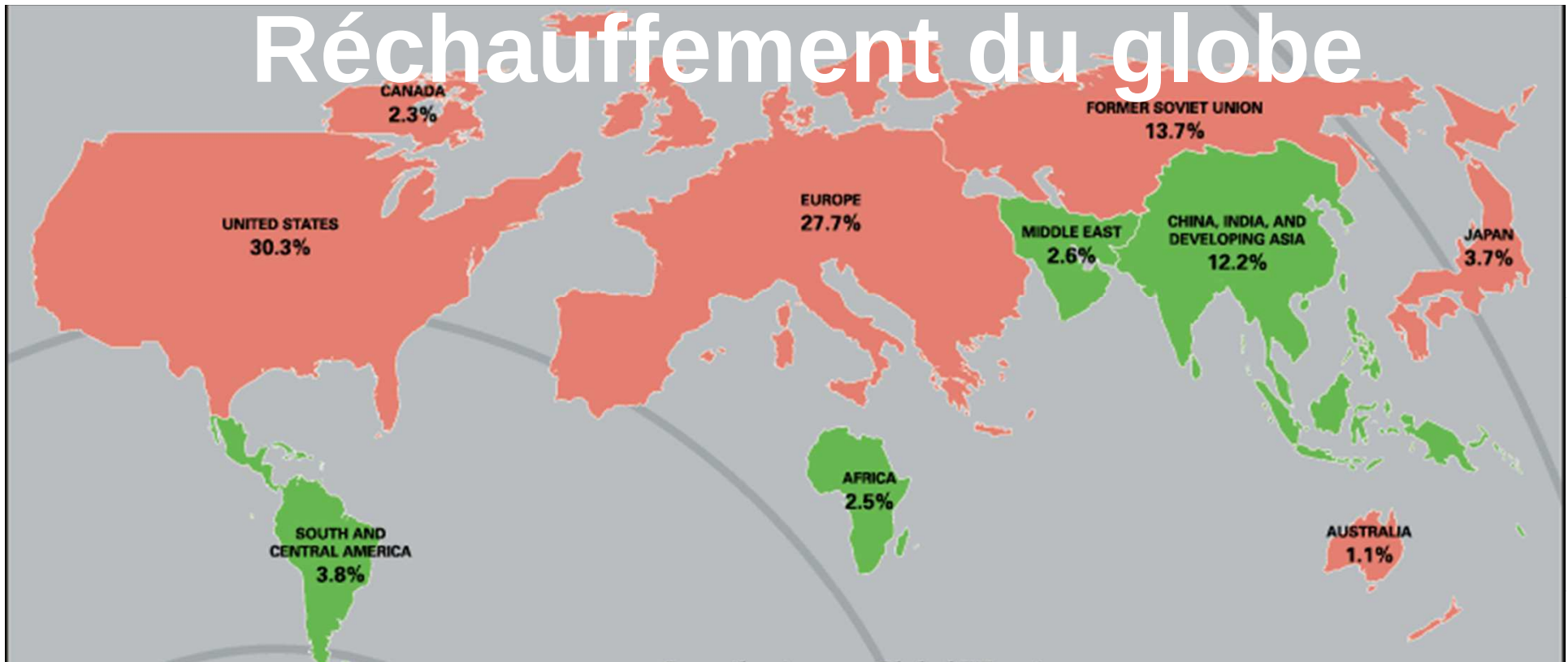
Cycle non fermé des
vecteurs énergétiques



Situation environnementale globale (suite)

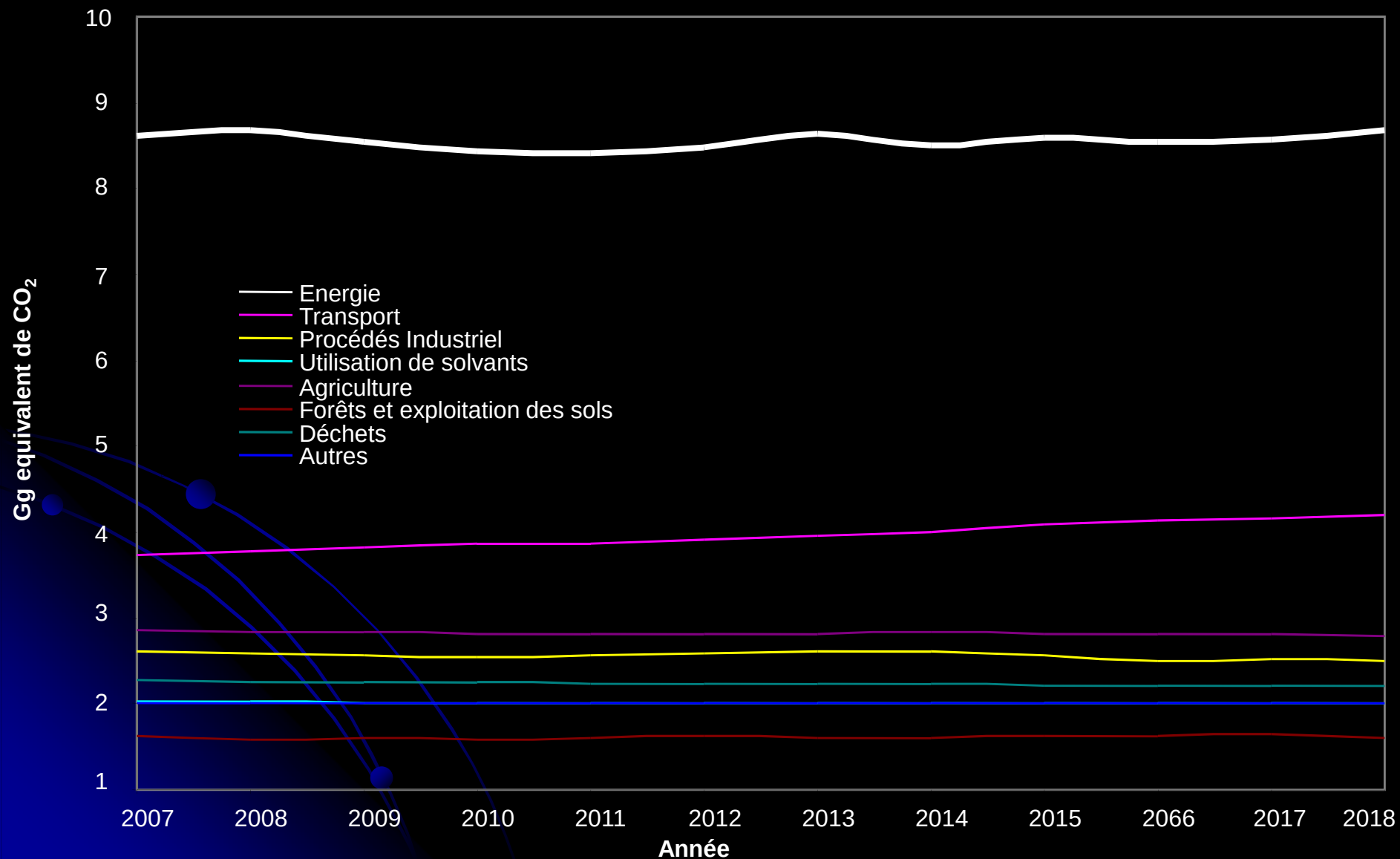
- Effet de serre et élévation de la température de l'air (dernières 70 années) soit :
 - 2,3 °C selon Princeton USA,
 - 1,3 °C, Hamburg Germany et
 - 1,7 °C, IPCC de London UK
- Elévation de la température des océans constituant 72% de la surface de la terre soit 0,06 °C depuis 1995 selon US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2001) et Scripps Institute of Oceanography à S.F.
- Le secteur d'énergie seul est responsable sur 46 % de la croissance de l'effet de serre ces dernières années soit 65% d'ici 2025 et d'autant plus en 2050, si rien n'est fait.

Réchauffement du globe



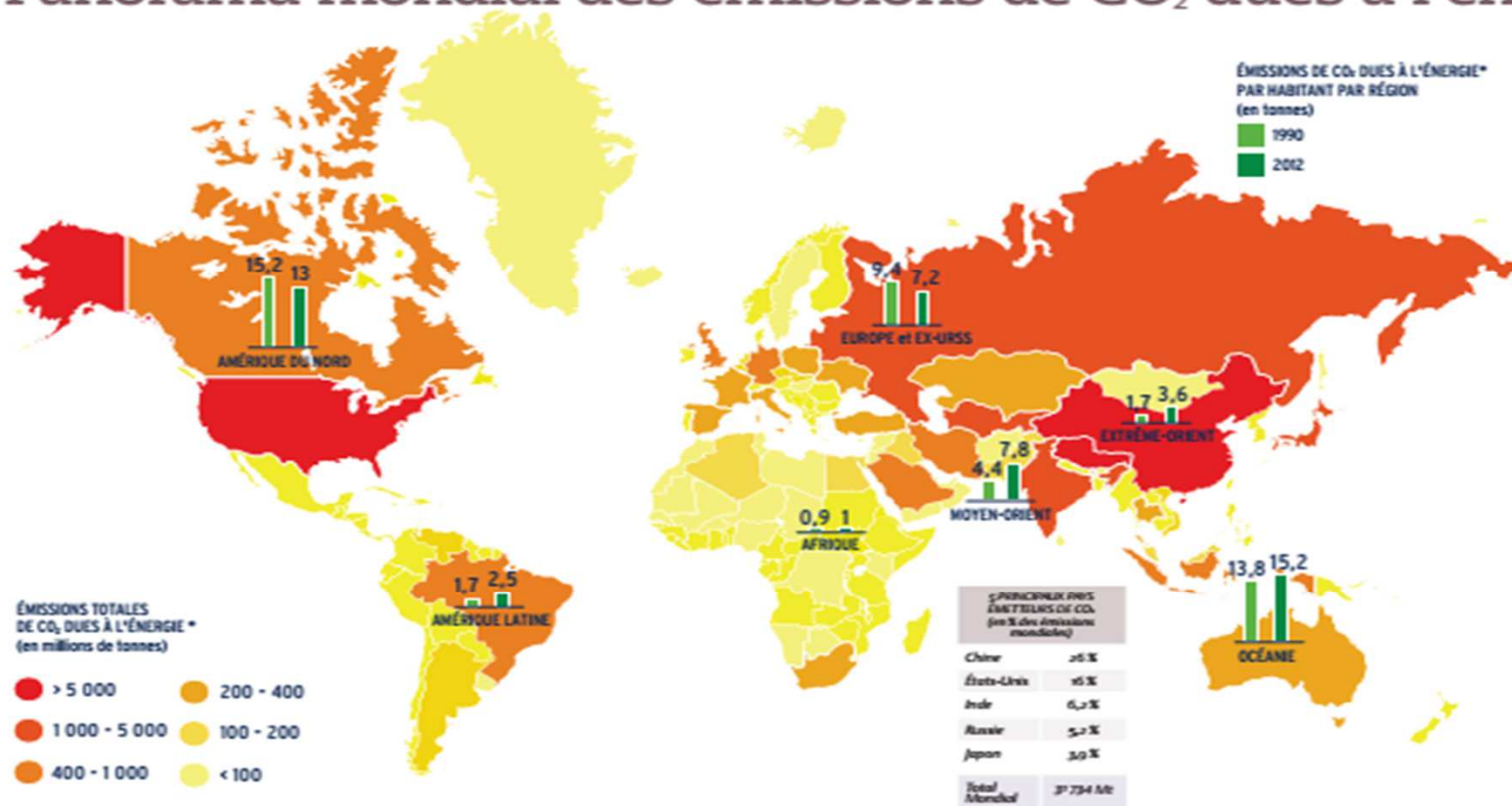
Emission de CO₂ par source (2015)

Emissions par source en Gg (eq) de CO₂



Émissions de CO₂ dues à l'énergie

Panorama mondial des émissions de CO₂ dues à l'énergie

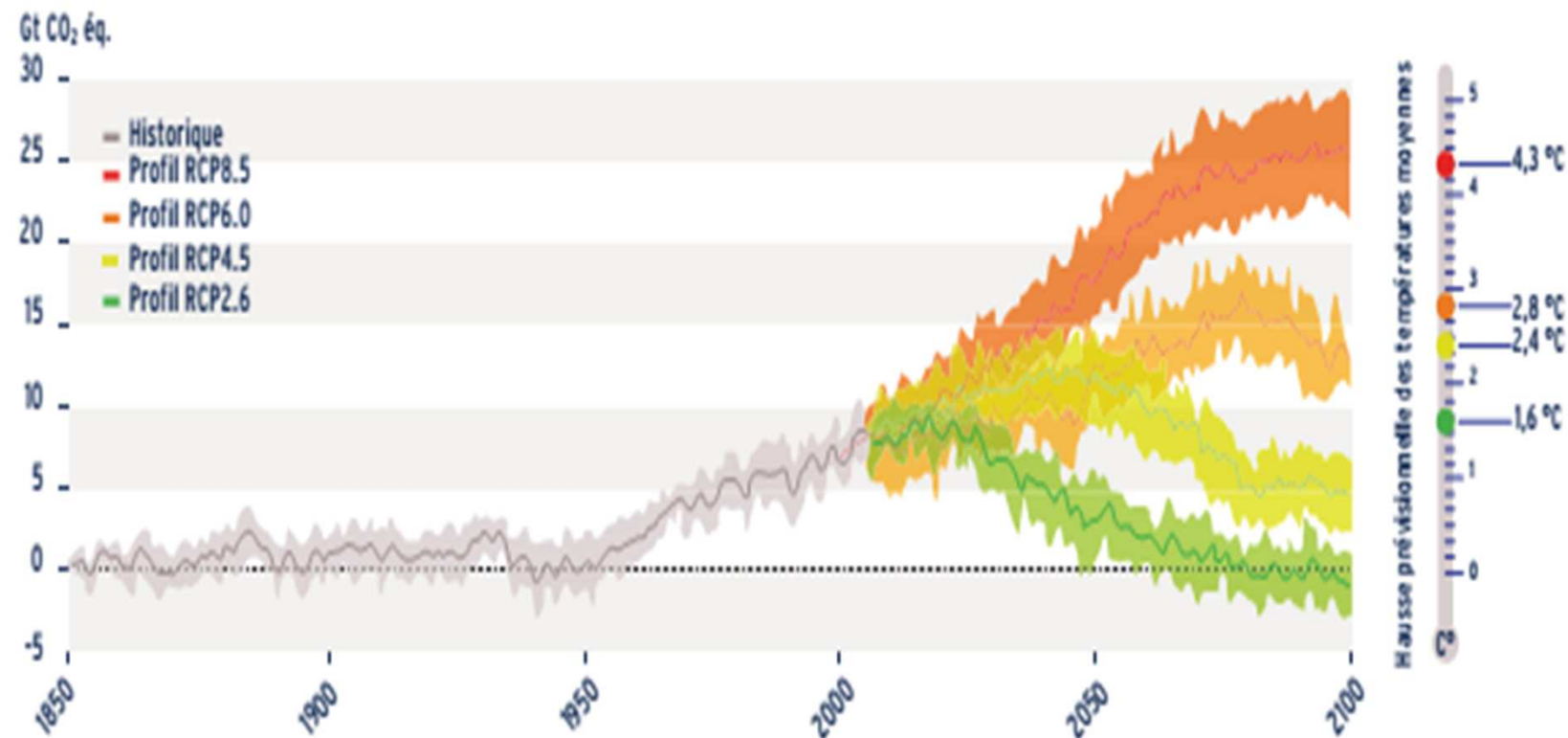


* Les émissions dues à l'énergie représentent la grande majorité des émissions.
Ces chiffres ne prennent pas en compte les émissions hors énergie, qui concernent un faible nombre de pays et dont la mesure est moins fiable.
Source : AIE, 2014

Les impacts du changement climatique – d'ores et déjà visibles pour certains, prévisibles pour d'autres – concernent toute la planète. Maîtriser les émissions de GES est donc un enjeu mondial majeur. L'objectif fixé dans le cadre des dernières négociations internationales : limiter à 2°C la hausse du réchauffement climatique. Mais pour relever ce défi, les besoins de financement sont de taille. Ils ne pourront être atteints sans une mobilisation massive des capitaux privés vers des projets durables.

Concentrations atmosphériques de GES de l'an 1850 à 2100

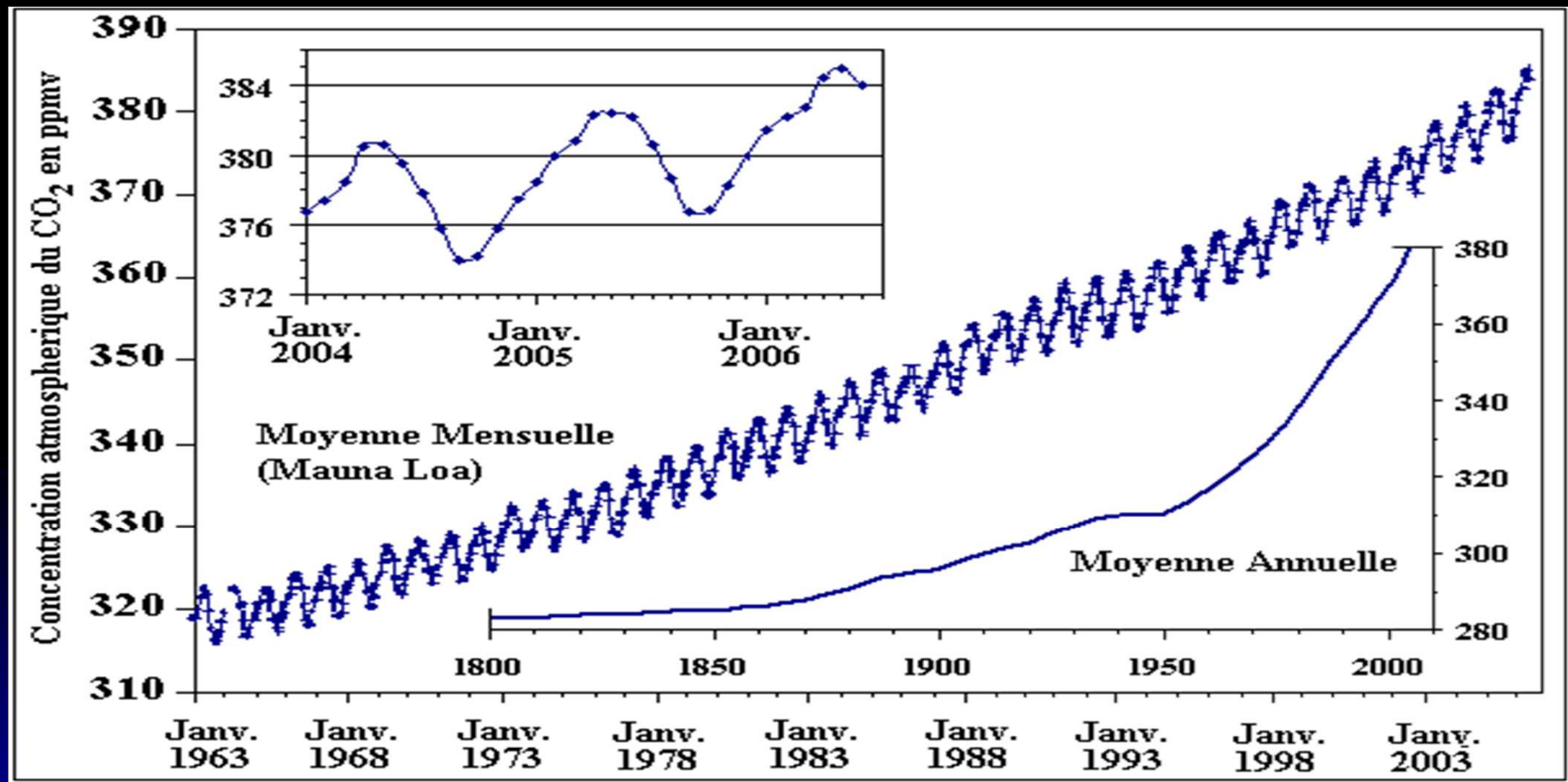
Emissions mondiales liées aux énergies fossiles selon les scénarios du Giec, 1850-2100

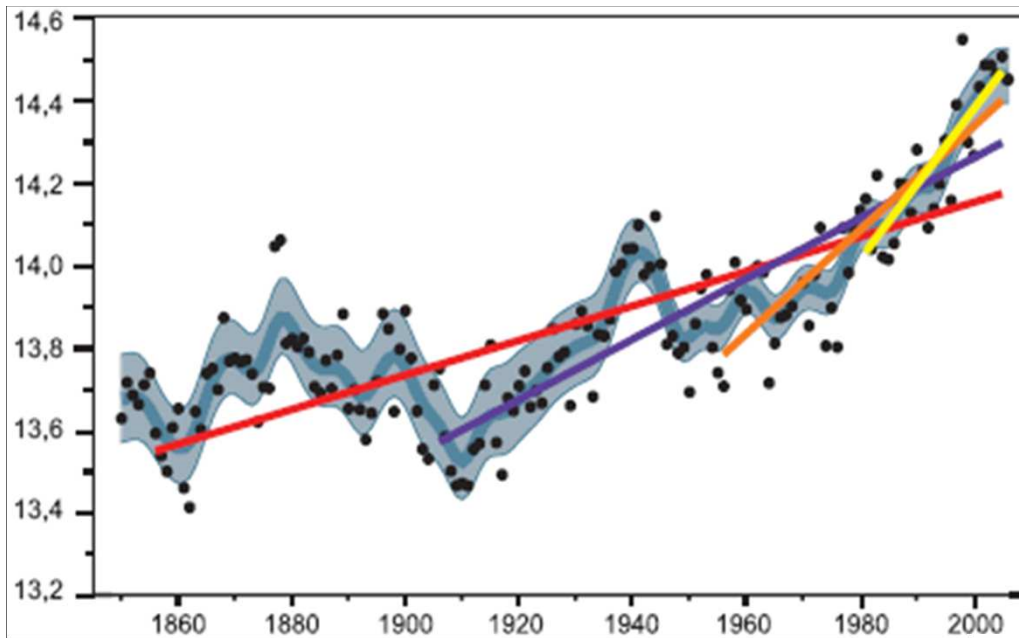


Note : Ce graphique correspond à la projection des émissions liées aux énergies fossiles suivant les quatre profils d'évolution de gaz à effet de serre (GES) du GIEC et des évolutions de températures associées (en moyenne sur la période 2081 - 2100 par rapport à l'ère préindustrielle). Seul le scénario RCP 2.6 permet d'être en deçà de l'objectif de 2°C au-dessus de la température de la période préindustrielle. Les RCP (Radiative Concentration Pathways) sont des scénarios de référence de l'évolution du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement montant) au sommet de la troposphère (10 à 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat sur la période 2006-2300.

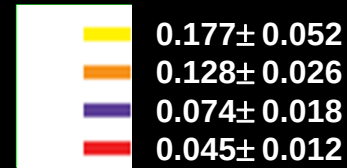
Source : GIEC, 2013 et calculs de la rédaction à partir du GIEC et de Hadcrut.

L'augmentation des émissions de CO₂

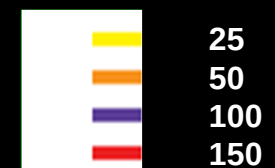




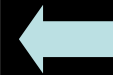
Augmentation de la température de l'air



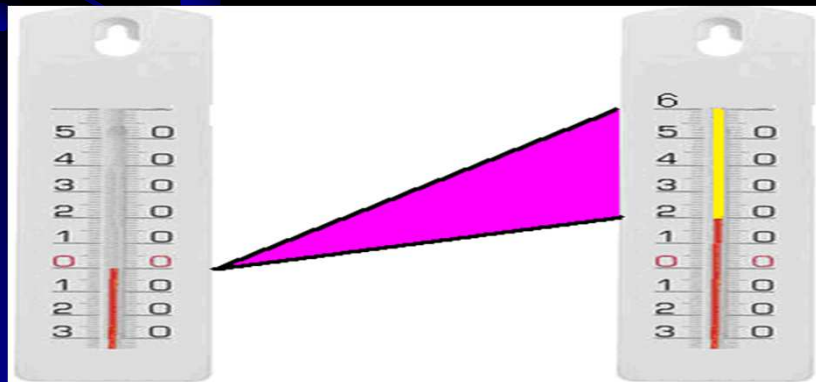
Période en année



Augmentation de la température de l'air pour une période de 155 années

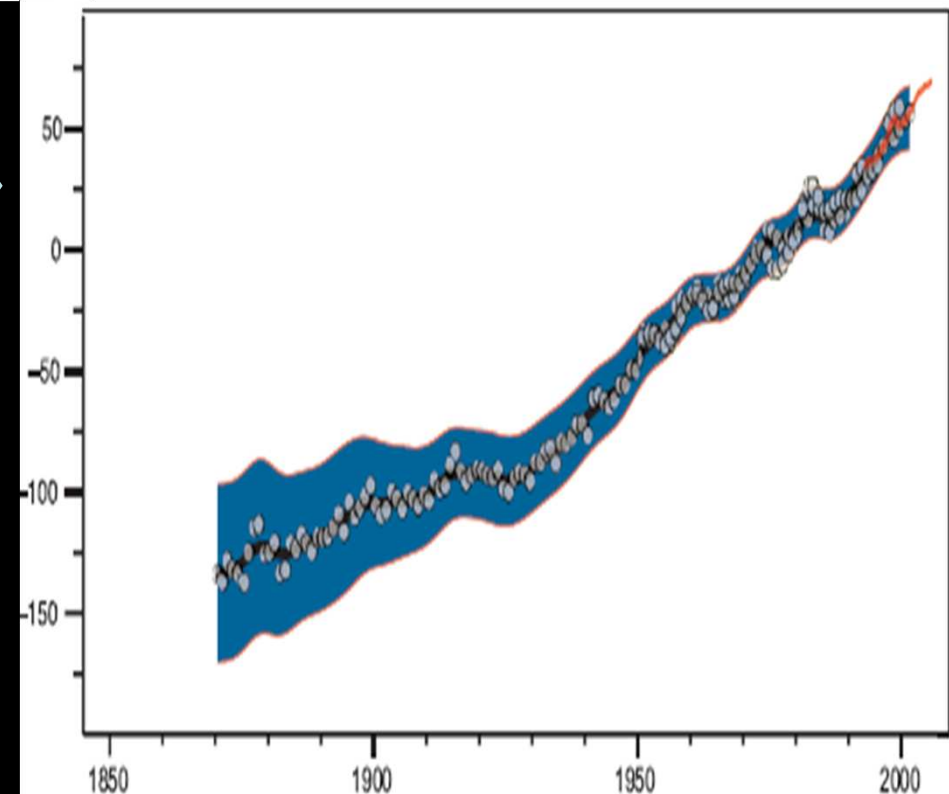


Augmentation du niveau du de mer pour une période de 130 années



1800

2100



Conséquences

Changement climatique



Elévation de la
température



Fonte des glaciers



Augmentation du
niveau de mer



Océans ondoyants



Santé



Agriculture



Pluviométrie



Ecosystème



Zones côtières



Eau potable



**Raréfaction
des ressources
en eau**

**Epuisement
des
combustibles
fossiles**

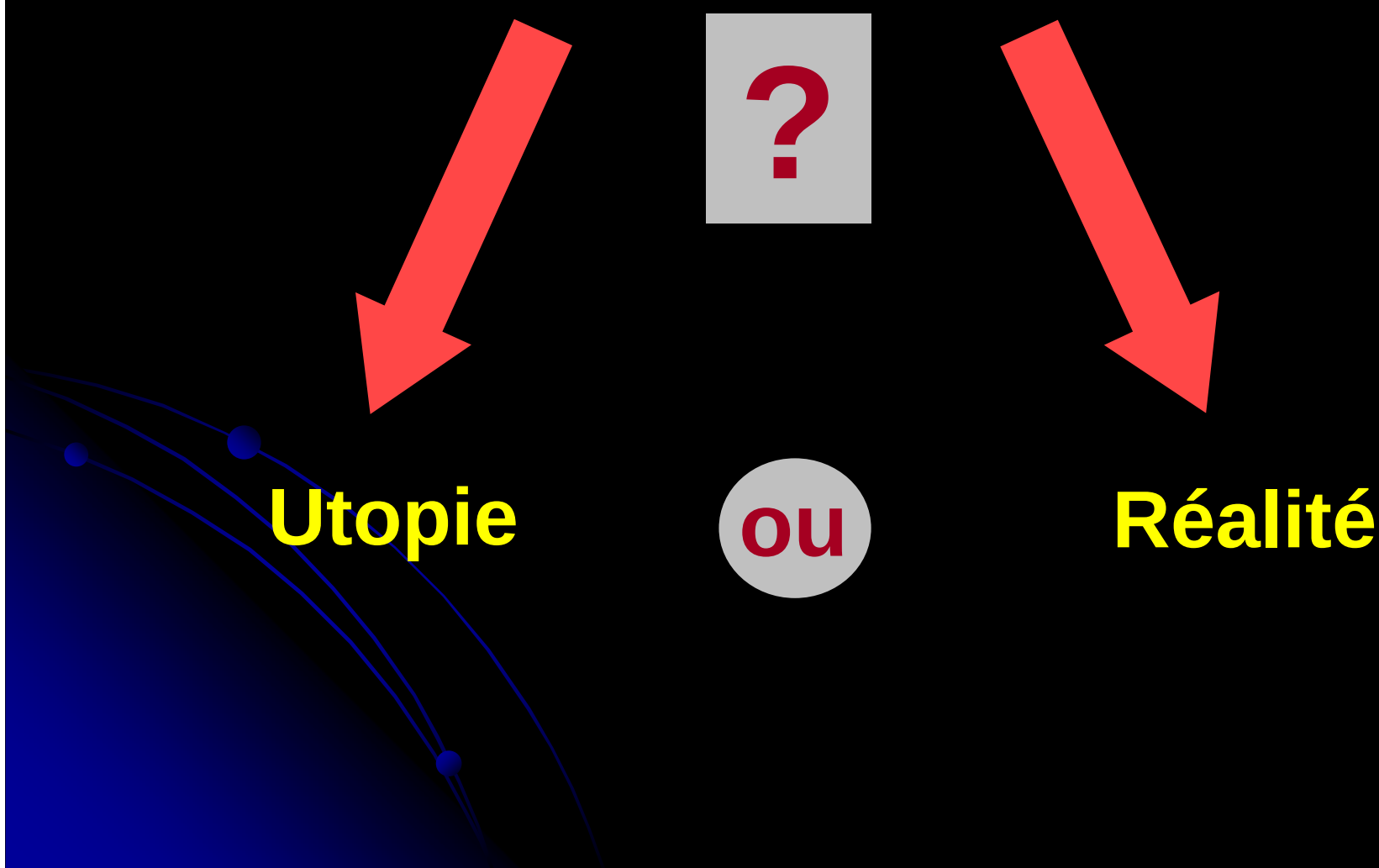
**Changements
climatiques**

Menaces majeures

**La prospérité et la sécurité futures
de l'humanité**

Les changements climatiques

Le développement durable



The diagram features a dark background with a blue gradient in the bottom-left corner. At the top, two horizontal bars contain the text 'Les changements climatiques' and 'Le développement durable'. Below these, two large red arrows point downwards from a central grey square containing a question mark. The left arrow points towards the word 'Utopie' in yellow, and the right arrow points towards the word 'Réalité' in yellow. Between these two words is a grey circle containing the word 'ou' in red. In the bottom-left corner, there are several blue dots and curved lines, resembling a stylized globe or orbital path.

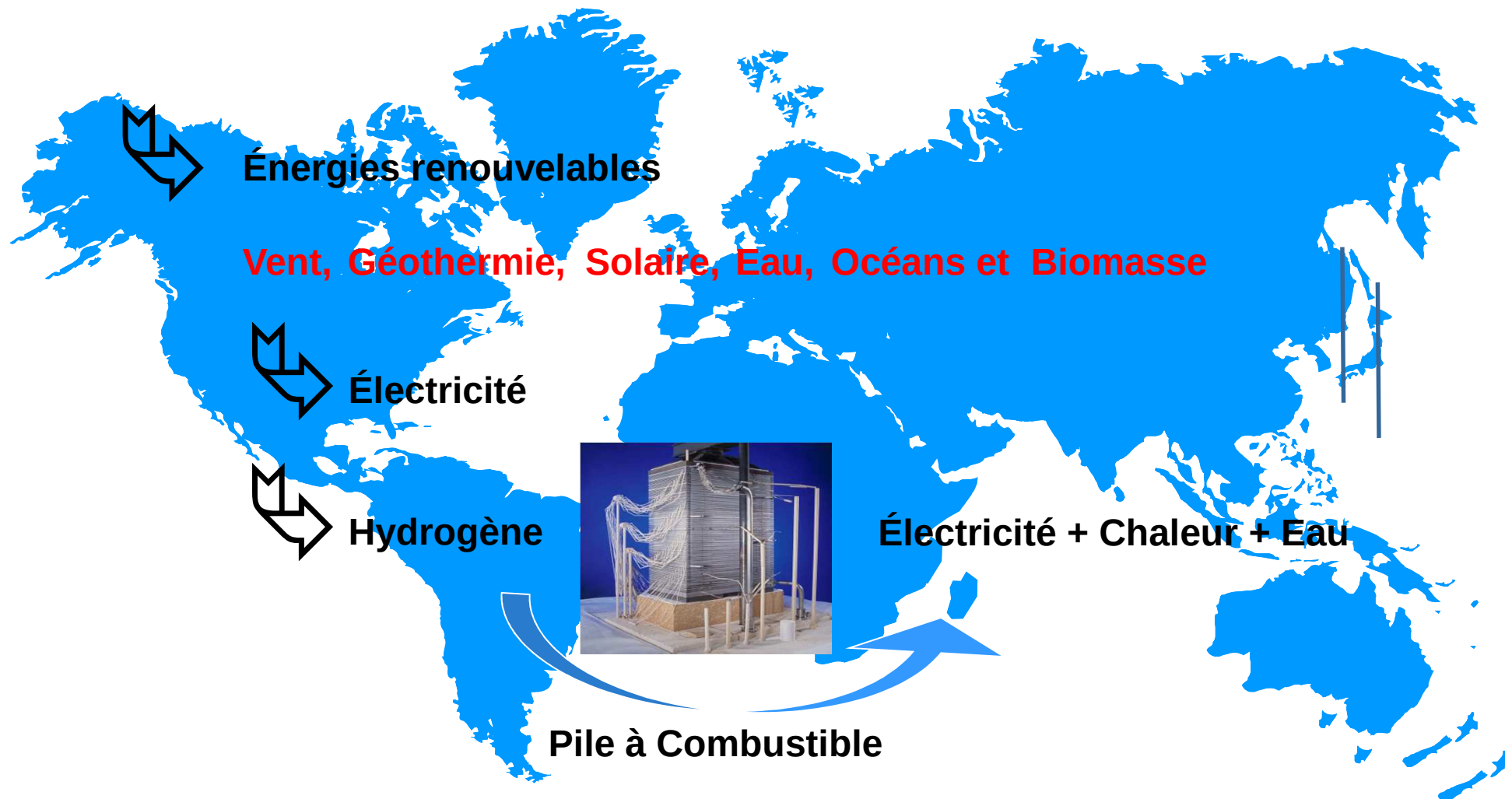
Utopie

ou

Réalité

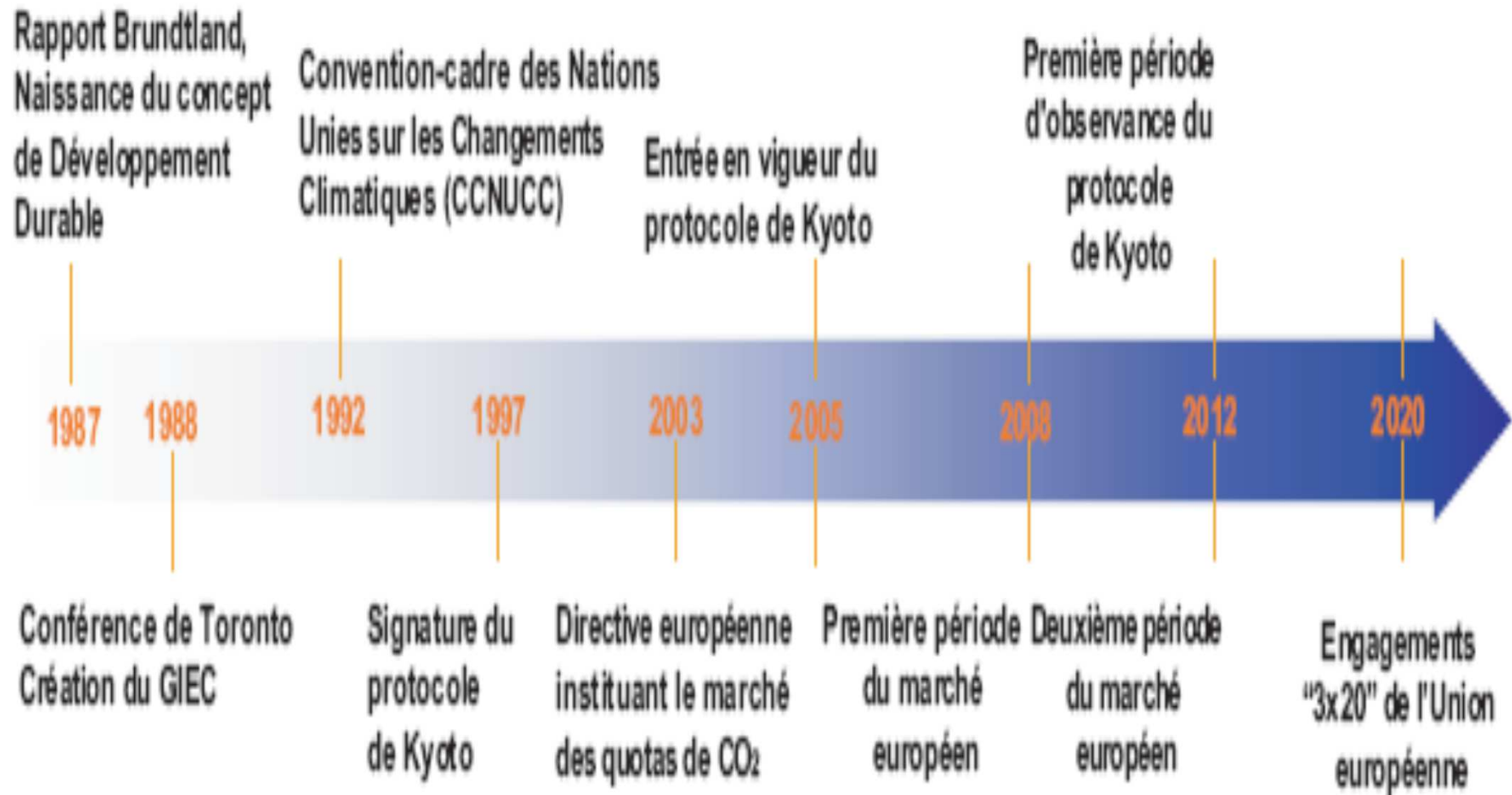
SOLUTION?

→ L'accord de KYOTO

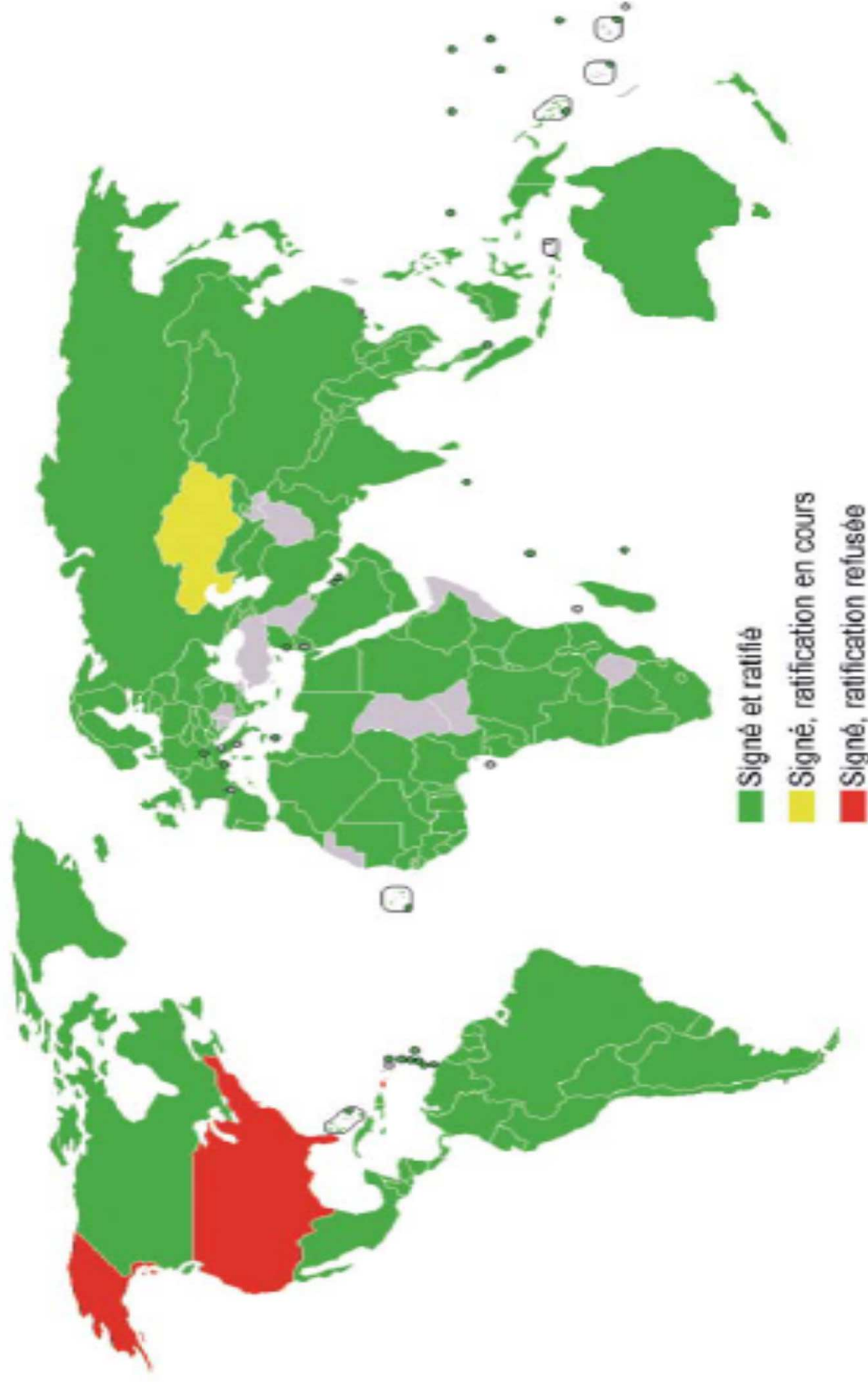


Les pays industrialisés doivent réduire leurs émissions de six gaz à effet de serre en moyenne de **2%** par rapport aux niveaux de 1990 pendant la première «période d'engagement» (2008-2012).

Le protocole de Kyoto



Etat de la ratification du protocole de Kyoto en 2008



Source : CCNUCC.

L'équation des trois E

Les énergies renouvelables assurent le développement durable et pourront être exploitées aussi longtemps qu'existera la terre.

Energy security
Sécurité énergétique

E

E

E

Environmental protection
Protection environnementale

Economic growth
Croissance économique



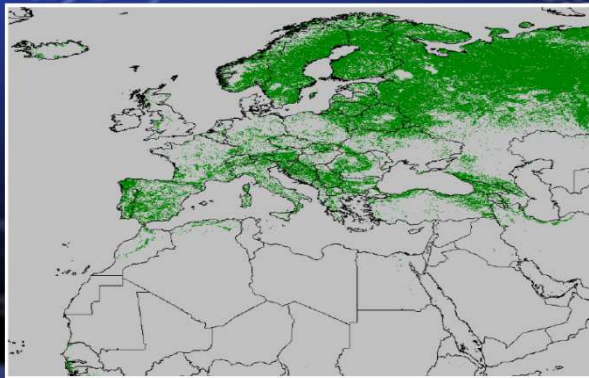
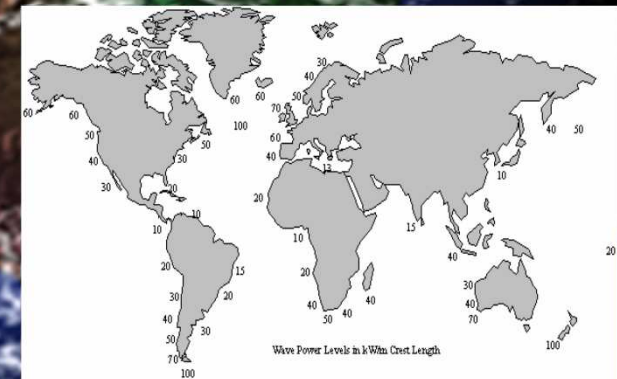
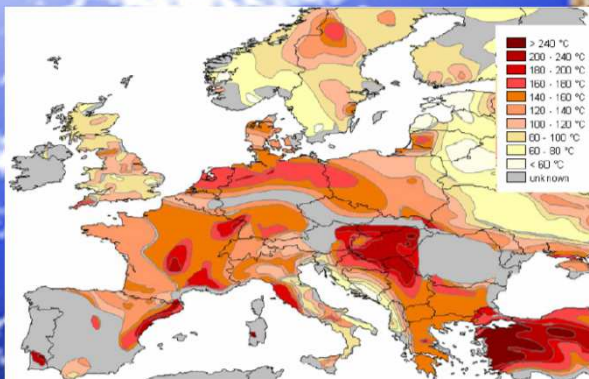
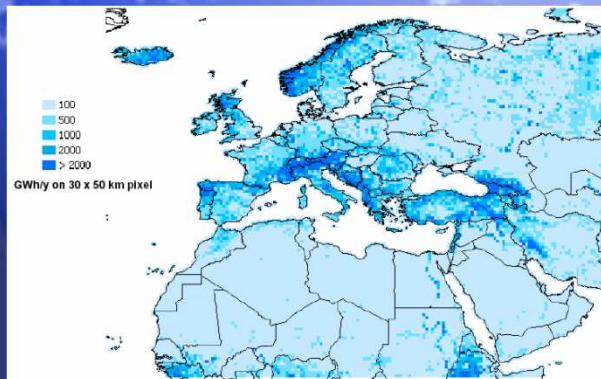
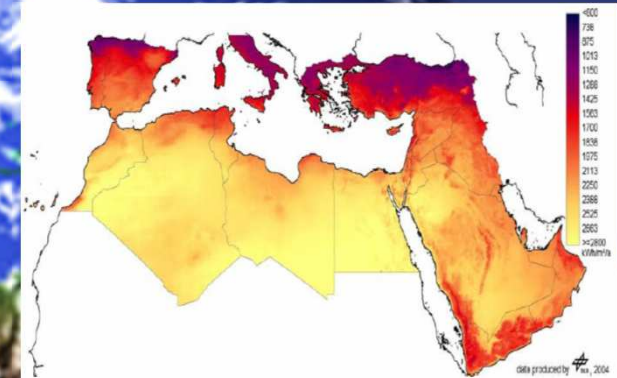
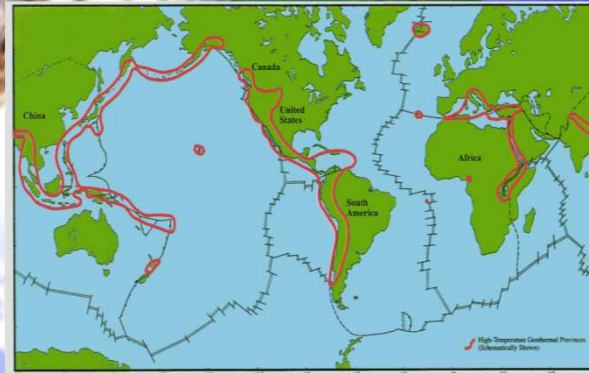
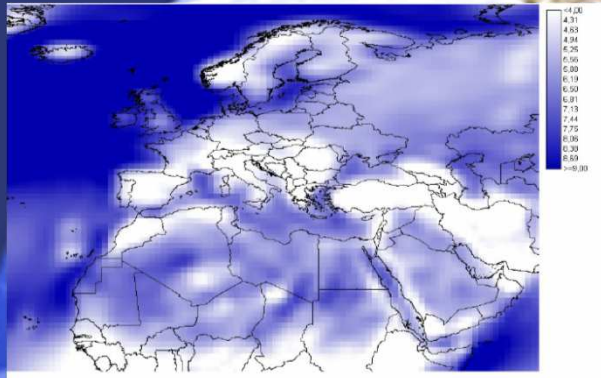
Politique
Systèmes Photovoltaïques
Utilisation Solaire Thermique
Architecture à Faible Energie
Energie du Vent, Eolien
Utilisation de la Biomasse & Conversion
Hydrogène & Piles à Combustible
Energie Marine
Energie Géothermique
Systèmes de Puissance Avancés
Utilisation de Chaleur & Efficacité
Energétique
Hydraulique & Energie Non-Conventionnel



Les Renouvelables

Énergies Renouvelables

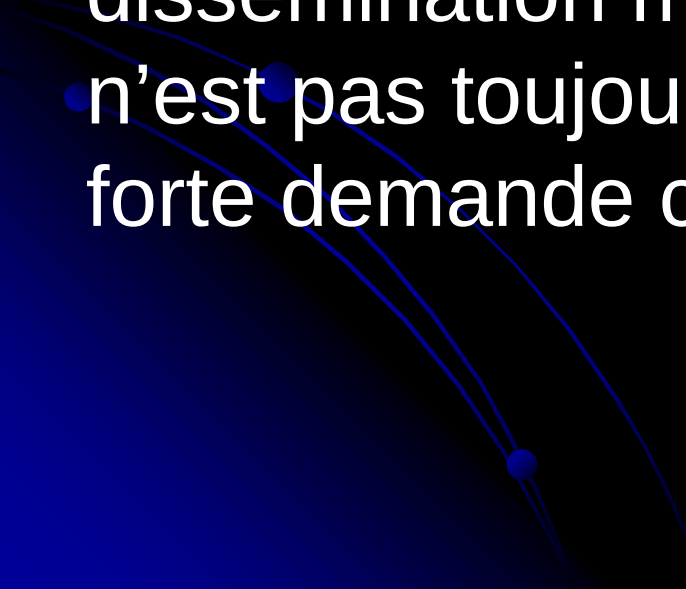
(Vent, Géothermie, Solaire, Eau, Océans ou courant marin et biomasse)



Energies renouvelables

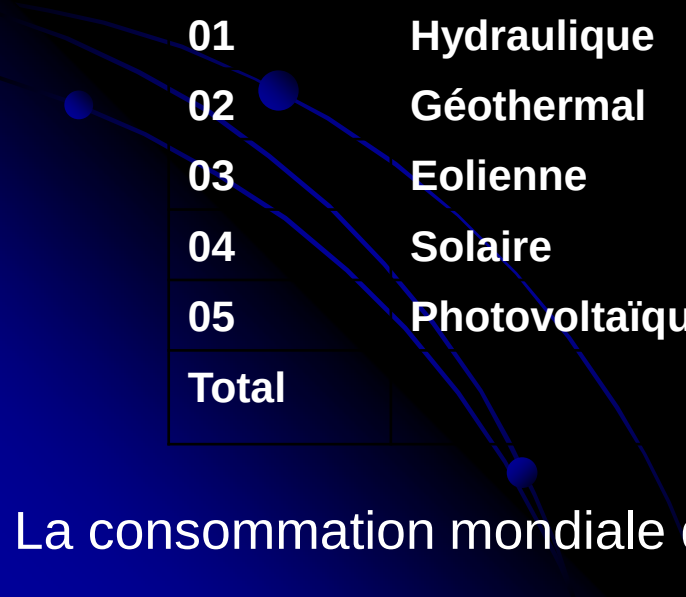
- C'étaient les sources d'énergies des premiers hommes qui, avec la maîtrise du feu, ont exploité le bois pour se chauffer et faire cuire leurs aliments;
- Les énergies renouvelables ont été utilisées pendant une période incomparablement plus longue que celle des combustibles fossiles;
- Elles ont eu le monopole de la production énergétique mondiale jusqu'à la fin du 18^{ième} siècle;

Energies renouvelables (suite...)

- Elles contribuent de manière importante à produire de l'électricité et de la chaleur;
 - Elles sont gratuites, mais leur récupération peut être chère;
 - Elles sont totalement matures pour une large dissémination même si l'appareil de production n'est pas toujours prêt à répondre à une très forte demande ce sont:
- 

Sources d'énergies renouvelables (ER)

- ENERGIE SOLAIRE
- ENERGIE EOLIENNE
- ENERGIE DE LA BIOMASSE
- ENERGIE HYDROELECTRIQUE
- ENERGIE GEOTHERMIQUE
- HYDROGENE



Rang	Source d'énergie	Puissance (MW)	Energie (kWhx10 ⁹)
01	Hydraulique	769000	3092.1
02	Géothermal	8600	59.34
03	Eolienne	25000	43
04	Solaire	2086	5.9
05	Photovoltaïque	2443	2.7
Total		807129	3203.03

La consommation mondiale d'électricité en 2005 était de 16015 milliards kWh

Énergies Renouvelables,

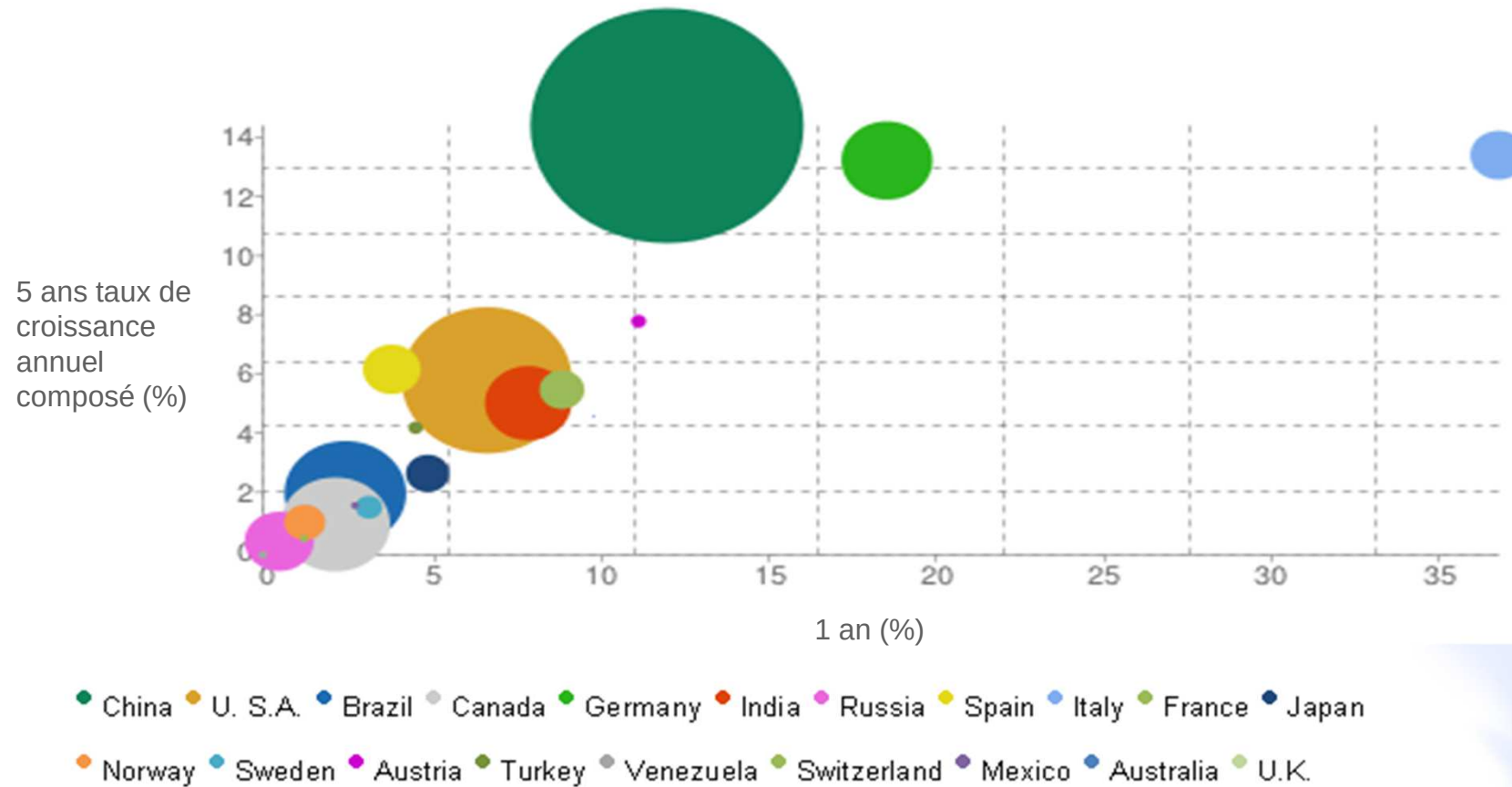
(production électrique, 2013)

(Vent, Géothermie, Solaire, Eau, Océans ou courant marin et biomasse)

N° =	Source d'énergie	Puissance (GW)
01	Hydraulique	997
02	Geothermie	60
03	Vent	268
04	Solaire thermique	292
05	Photovoltaïque	120
06	Biomass	95
Total	ER	297 Mill USD
Invest/An		

Énergies Renouvelables, (le marché)

Top 20 des marchés du renouvelables. Taux de croissance sur 1 et 5 ans



Axe X = 1 année pour cent de croissance
Axe Y = 5 années taux de croissance annuel composé

Données sur l'emplois dans le domaine des ERs

En 2010, 3,5 millions de postes, de ces emplois on a :

630 000 dans l'industrie éolienne

350 000 dans l'industrie solaire PV

1,5 millions dans le secteur des biocarburants:

La majorité d'emplacement: la Chine, le Brésil (éthanol), l'Allemagne, l'Inde, USA, Danemark

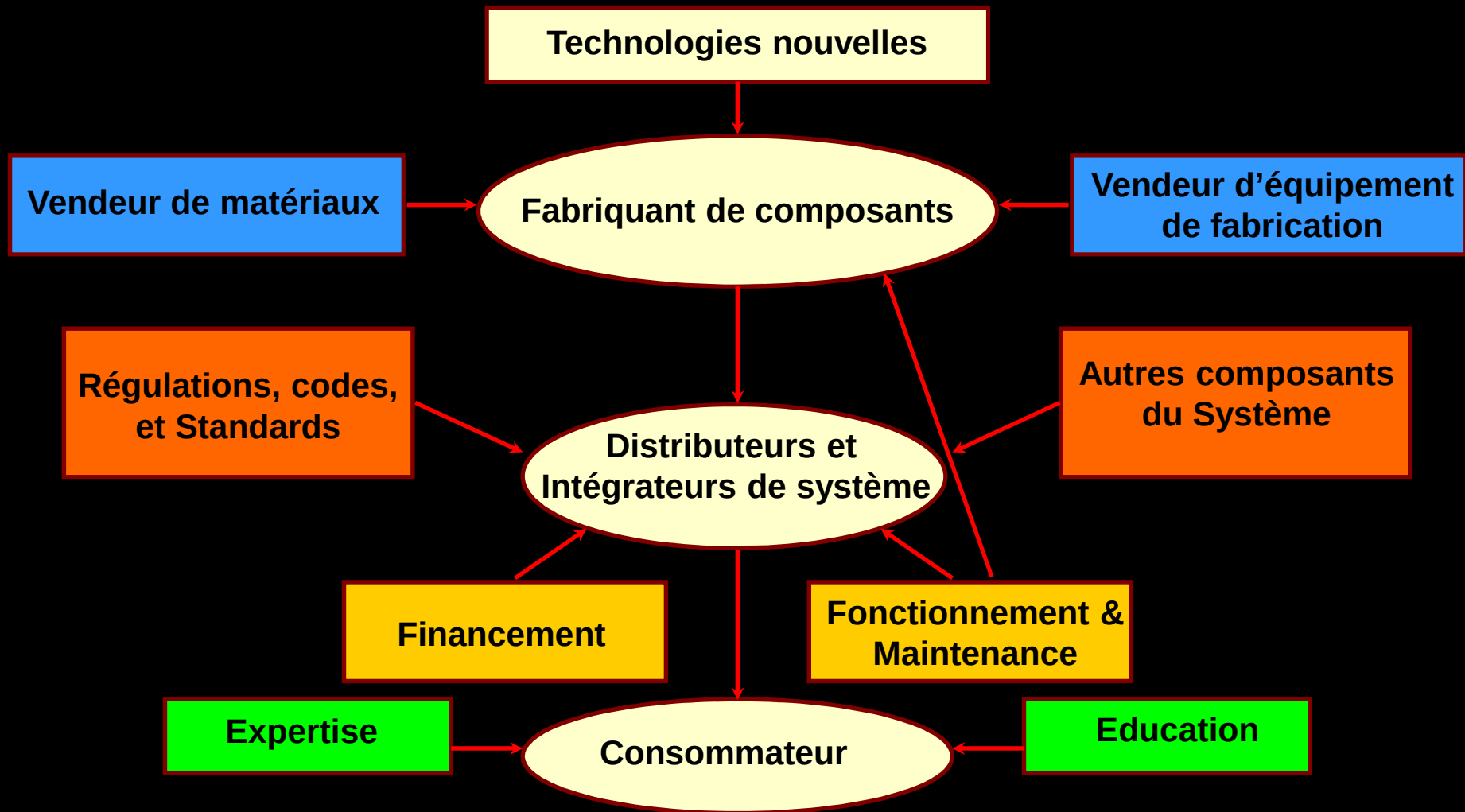
ERs nécessitent plus de main-d'œuvre que les technologies des combustibles fossiles, les technologies PV représente le plus grand nombre d'emplois par an par GWh au cours de la durée de vie de l'installation

Solaire photovoltaïque: 0,85, Petites centrales hydroélectriques: 0,27, Géothermie: 0,25, Solaire thermique: 0,22, Biomasse: 0,21, Vent: 0,19, Nucléaire: 0,18, Gaz naturel: 0.11 / 0.12

Avantages des énergies renouvelables

- Alternative aux énergies fossiles
- Inépuisables et gratuites
- Avantages évidents pour l'environnement
- Alternatives technologique pour l'électrification des sites isolés
- Économie des énergies fossiles
- Création d'emplois par le développement de l'industrie directe et connexe, des métiers, du commerce, de la prestation de services...

Electricité verte, du producteur au consommateur



L'opportunité d'exploitation des ERs en Algérie devrait être encouragée afin de prendre en charge les problèmes qui se profilent en matière de protection de l'environnement et de développement durable.

L'Algérie d'aujourd'hui en a les moyens et les capacités.

ERs en Algérie	Solaire Thermique	Solaire Photovoltaïque	Eolien	Hydro	Géothermie	Biomasse
Potentiel Economique	168,972	>13.9	35	0.5	4.7	12.1

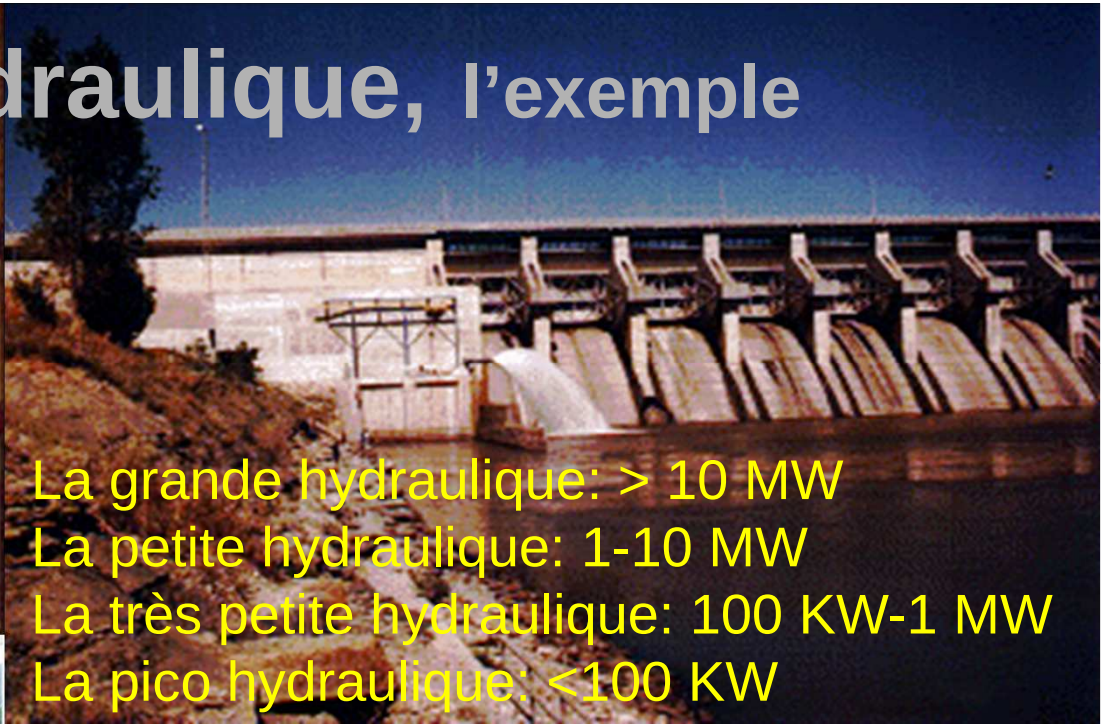
TWh/année

le potentiel solaire / an (économique), est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel semblable à celui de Hassi R'Mel.

Structures d'état s'occupant des ERs en Algérie: Sonelgaz, NEAL
UDTS/CDTA, UDES/CDER, URAER (Ghardaia), URER/MS (Adrar), ENIE,

Universités....et structures privées

Energie hydraulique, l'exemple



La grande hydraulique: > 10 MW

La petite hydraulique: 1-10 MW

La très petite hydraulique: 100 KW-1 MW

La pico hydraulique: < 100 KW



Energie hydraulique

- C'est l'énergie issue et produite par la force de l'eau ;
- Le quart de l'énergie qui provient du soleil est absorbée par le cycle de l'eau; au cours de celui-ci, une infime partie de l'eau des océans est évaporée puis revient sur terre sous forme de précipitation (pluie ou neige);
- Le terrain, les petits ruisseaux, les torrents et les rivières sont autant de moyens naturels pour concentrer la pluie venant du ciel dans des lacs de retenue qui permettent de stocker l'énergie;

Energie hydraulique (suite...)

- L'exploitation de l'énergie hydraulique utilise la variation d'énergie potentielle de l'eau en fonction de la hauteur. Un corps de masse m situé à une hauteur h a, dans le champs de pesanteur terrestre dont l'accélération est g , une énergie potentielle « mgh ». S'il passe de la hauteur h_1 à $h_2 < h_1$, son énergie diminue de « $mg(h_1 - h_2)$ ». On peut récupérer une partie de cette énergie lorsque l'on fait passer l'eau dans une turbine.

Energie hydraulique (suite...)

- L'exploitation de l'énergie hydraulique c'est à dire la puissance que l'on peut extraire d'une chute d'eau est proportionnelle à son débit et à sa hauteur. Ceci varie selon les régions;
- Le potentiel théorique mondiale de l'hydraulique est de 36000 TWh mais seulement 14000 TWh seraient exploitable. On utilise actuellement moins de 20% de ce potentiel;
- L'hydraulique est la source d'énergie renouvelable commerciale la plus utilisée;

Energie hydraulique (suite...)

- 35000 MW d'électricité est produite à travers le monde soit environs 19% du globale électrique;
- 95% de la production d'électricité en Amérique du nord est de source hydraulique; 90% en UE et 2-3% dans les pays Arabes;
- Le potentiel hydraulique de l'Algérie est estimé à 25 milliards de m³. La quantité d'électricité produite par l'hydraulique représente 5% de la production totale. Les 13 sites produisent environs 269.208 MW /an. Le reste soit 94.5% de l'électricité Algérienne est généré par la combustion du gaz naturel.

Potentiel hydraulique de l'Algérie



Site	Puissance installée (MW)	Site	Puissance installée (MW)
Darguina	71.5	Ighzernchebel	2.712
Ighil Emda	24	Gouriet	6.425
Mansouria	100	Bouhanifia	5.700
Erraguene	16	Oued Fodda	15.600
Souk El Djemaa	8.085	Beni Behde	3.500
Tizi Meden	4.458	Tessala	4.228
Ghrib	7.000		

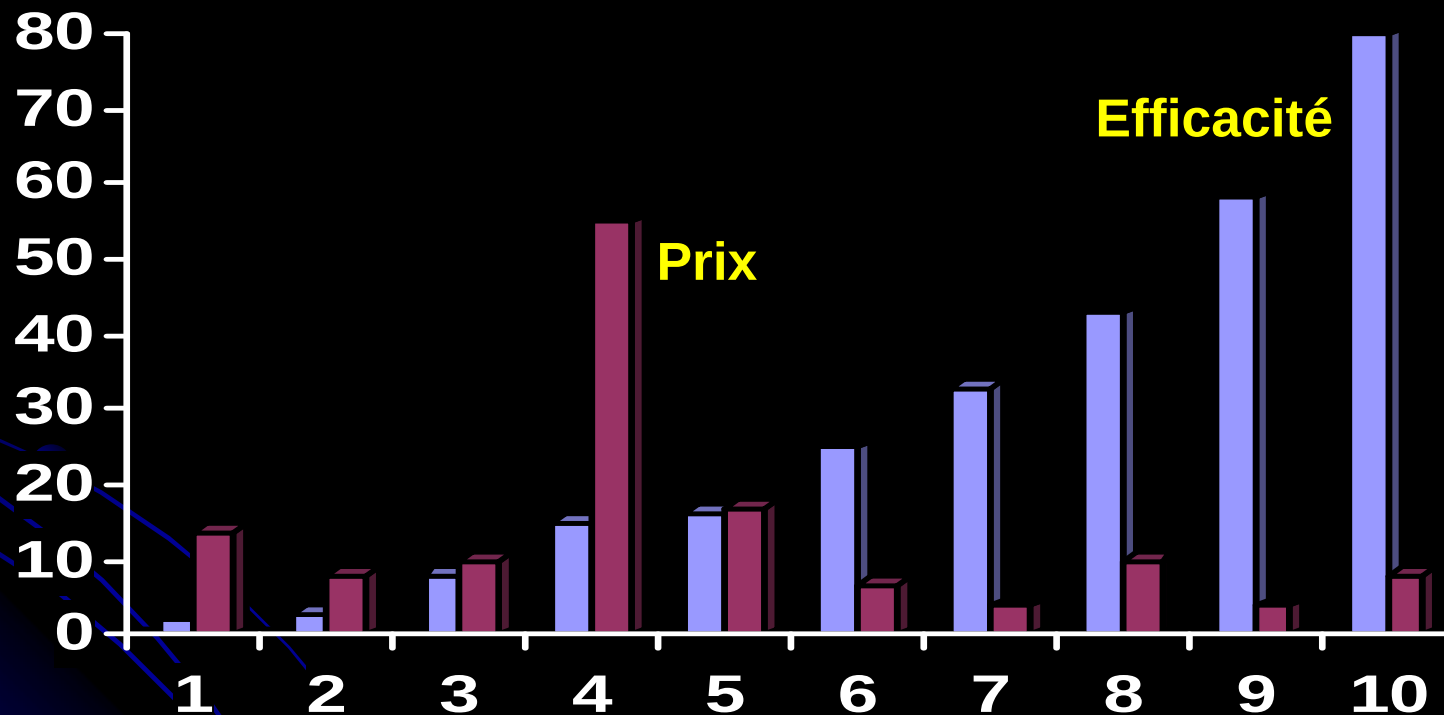
Energie hydraulique

Pourcentage de production d'électricité

Région	Énergie installée (650,000 MW)	En projet (135,000 MW)	Capacité non développée (> 15,000,000 MW)
Europe	25	17	5
Amérique du nord	24	1	6
Amérique latine	16	18	25
Afrique	3	2	17
Chine	8	39	21
Reste de l'Asie	24	23	26

Energie hydraulique (suite...)

- L'énergie hydraulique est coûteuse en investissement mais économique en fonctionnement.



1> Biomasse 2> Océan 3> Géothermal 4> Photovoltaïques 5> Solaire Thermal
6> Eolienne 7> Nucléaire 8> Charbon 9> Gaz 10> Hydraulique

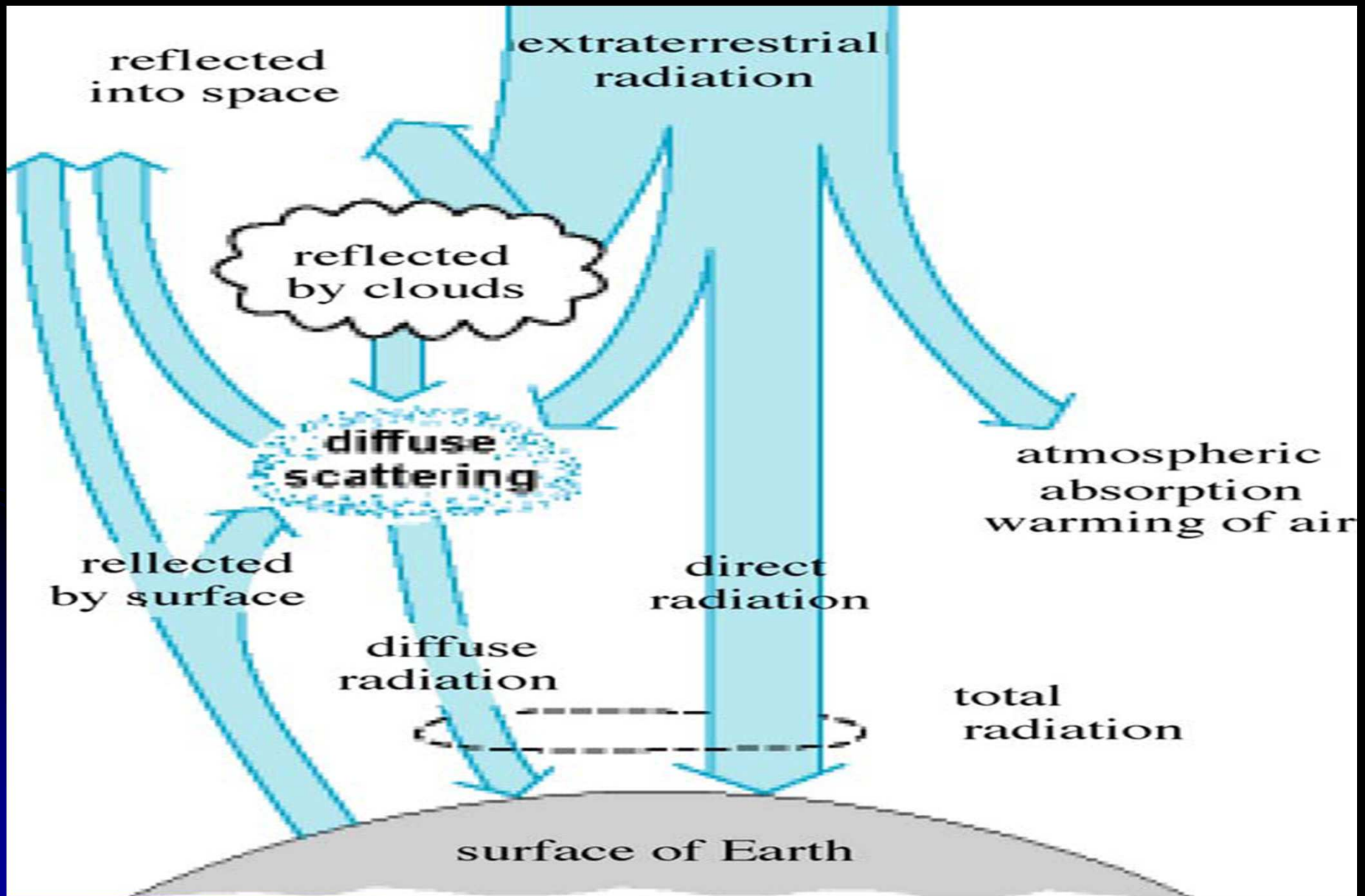
Energie hydraulique (suite...)

- L'exploitation de l'énergie hydraulique, dans les pays arabes, est très limitée à cause du manque d'eau le taux de production est très faible soit 2-3%;
- La grande hydraulique est particulièrement rentable , avec un coût du kWh autour de 2 centimes d'Euros. La petite hydraulique produit un kWh un peu plus cher, environ le double.

Energie solaire



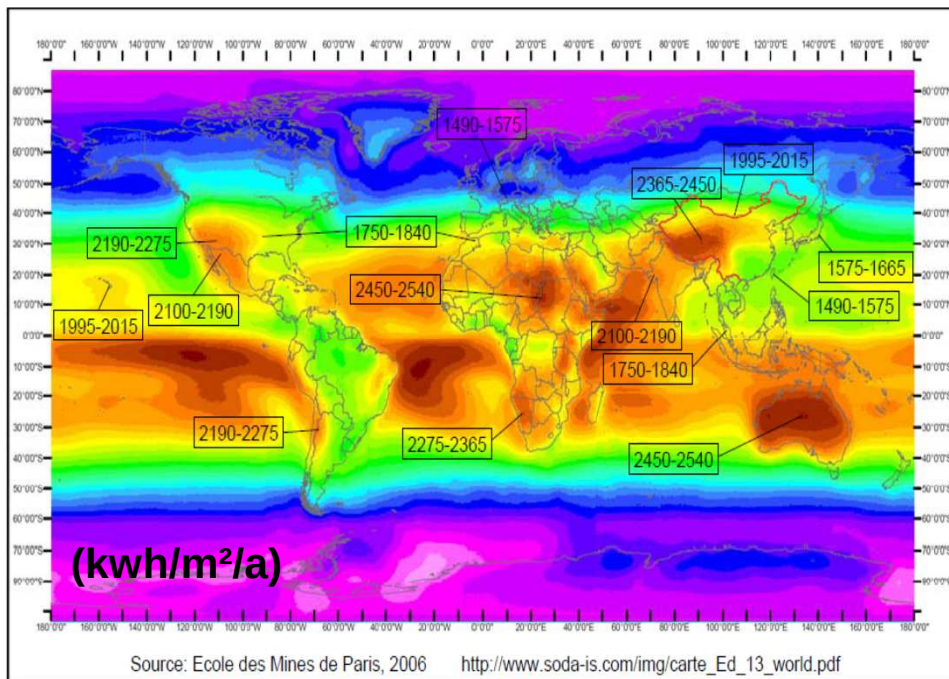
Energie solaire



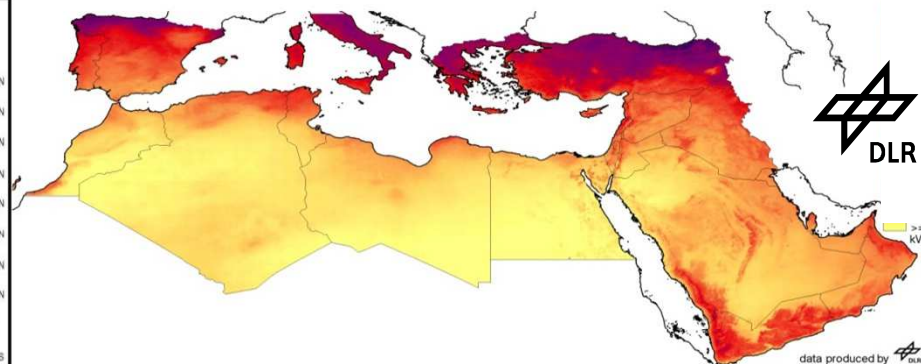
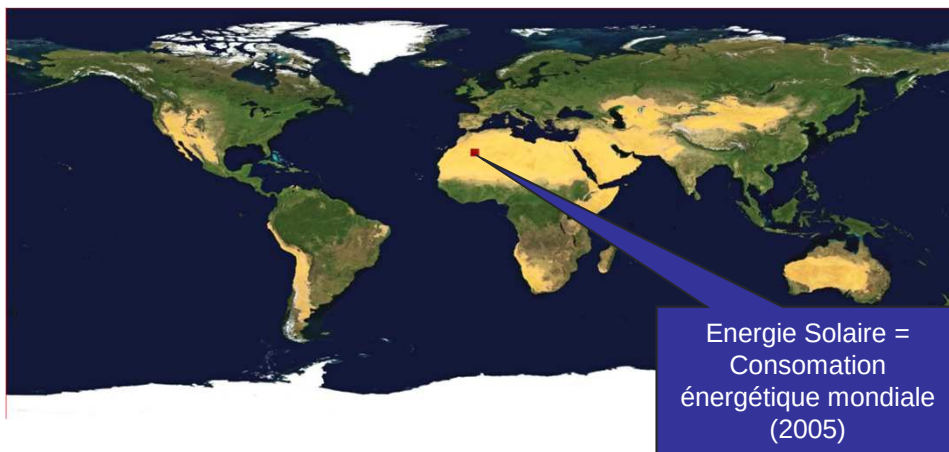
Energie solaire

- La terre reçoit en moyenne une puissance solaire de 1,368 kW/m²; Soit une puissance globale de 174000 TW;
- 17000 fois la capacité électrique disponible sur terre
- 1/1000ème de la puissance solaire vaut 3 fois la consommation mondiale en énergie;
- Le sud algérien reçoit à une moyenne d'ensoleillement de dix heures par jour une énergie électrique de 8 kWh/m². Ceci est l'équivalent d'une énergie thermique de 6880 kcal/m² qui représente approximativement un litre d'essence par mètre carré.
- Le 1/10ème de notre Sahara permet d'alimenter l'Europe entière en énergie solaire;
- Les évaluations du potentiel en énergies solaire effectuées par satellites (DLR) ont donné :
 - Pour le solaire thermique : 169440 TWh/an
 - Pour le solaire photovoltaïque : 13,9 TWh/an

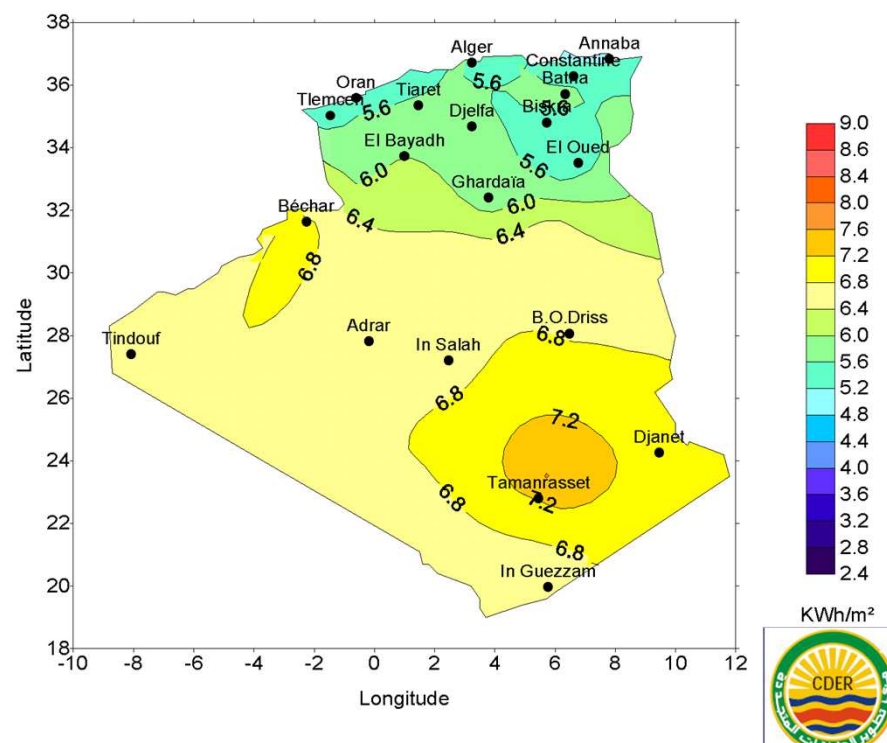
Potentiel solaire mondial, MENA et Algérie



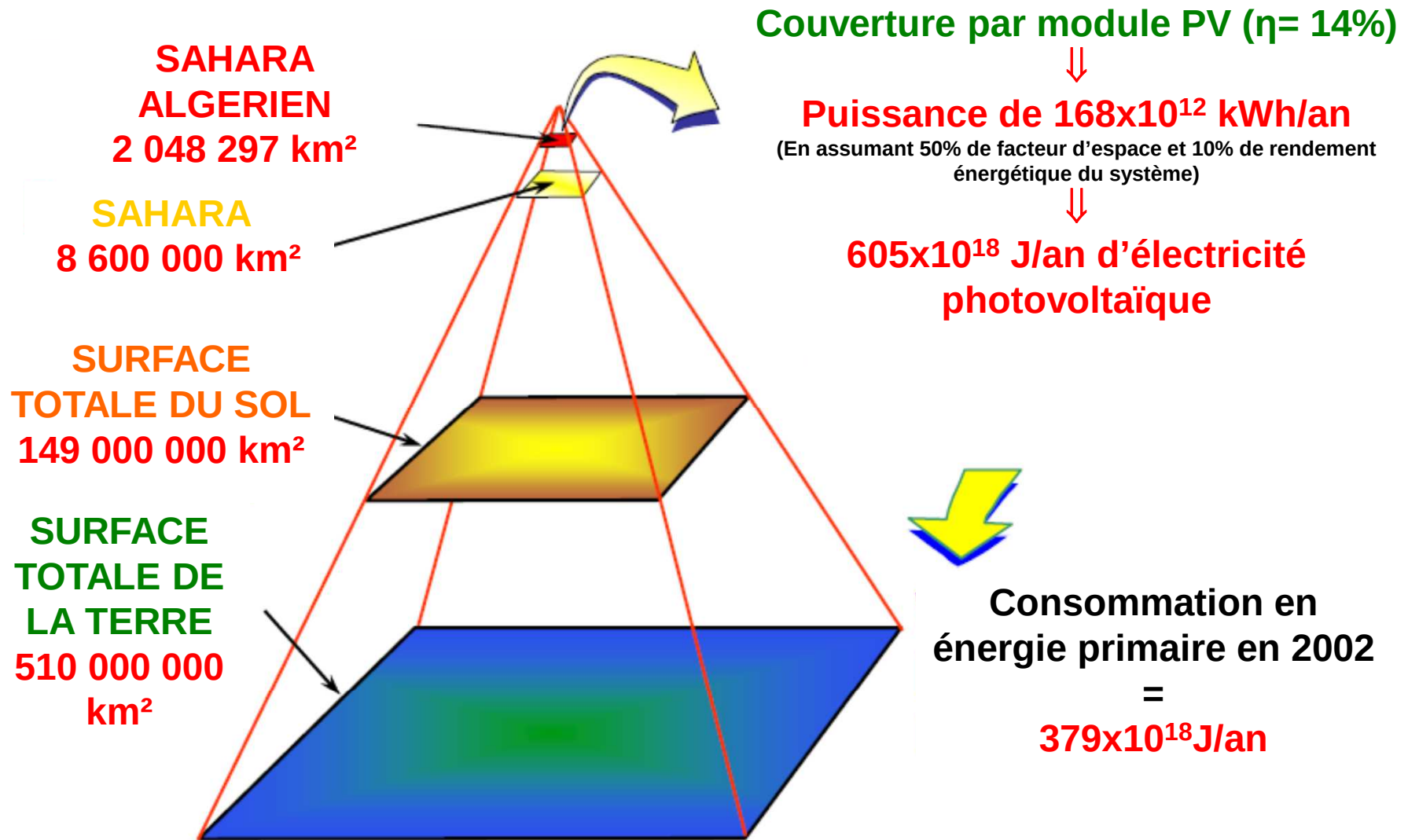
Il est clair que le monde arabe est l'endroit idéal puisqu'il se positionne au milieu du monde. En Algérie, on a un ensoleillement au Sahara de plus de 2200 kWh/m²/an



Potentiel Economique > 600 000 TWh/y
Rendement Maximum 250 GWh/km²



Pyramide solaire

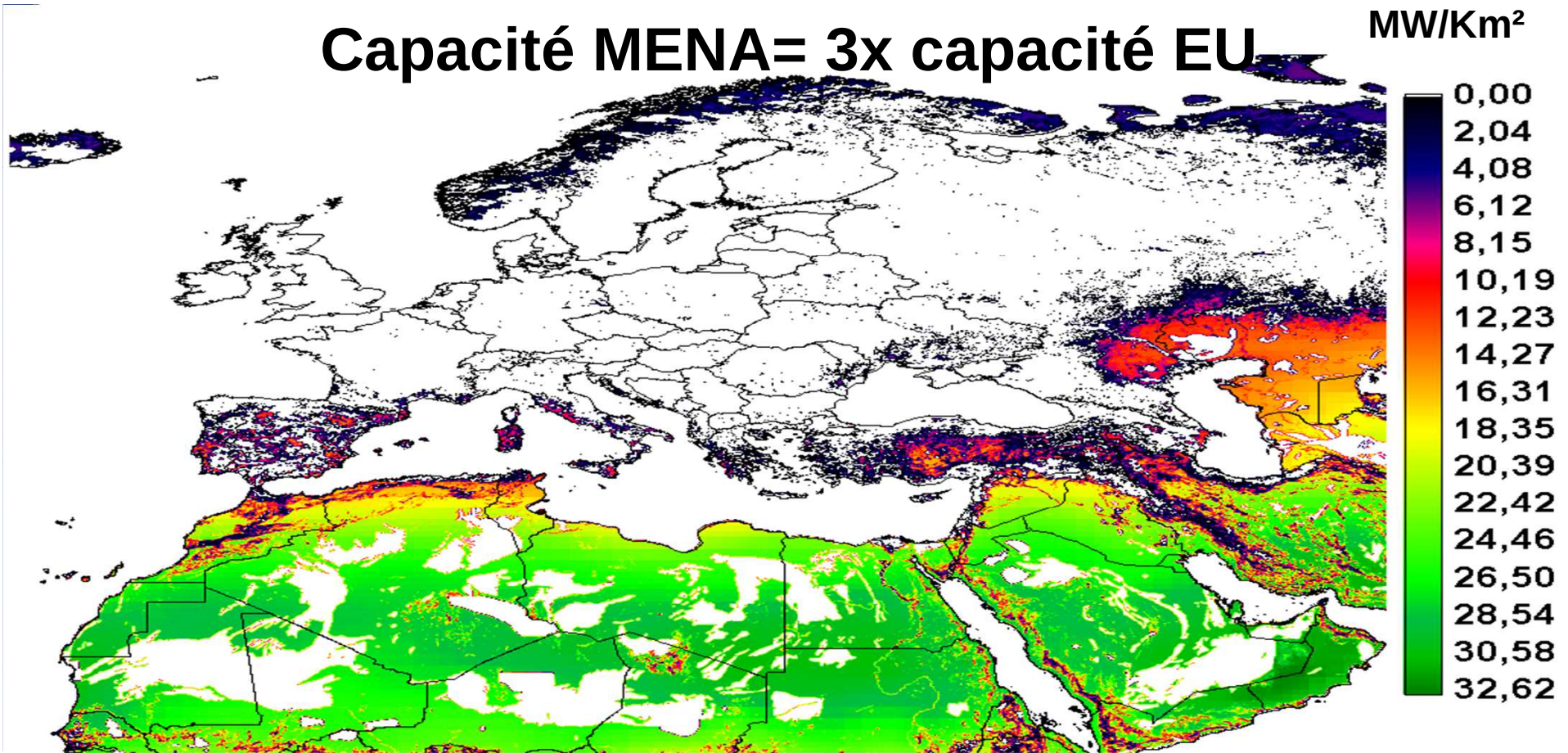


Désert = Espace mort pouvant être une île de trésor d'énergie

Energie solaire MENA-EU

Capacité MENA= 3x capacité EU

MW/Km²



Nouveaux projets solaires

Nouvelles locations	Capacité (MW)	Coût est. (10 ⁶ US\$)
Megahir	80	322
Naama	70	285
Hassi R'mel II	70	285

Energie solaire, l'application



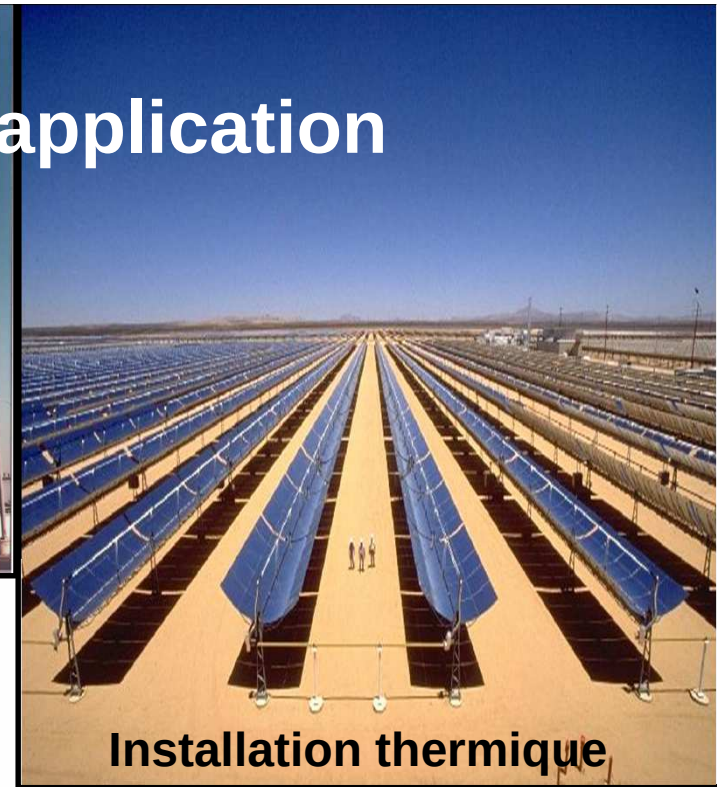
Installation photovoltaïque



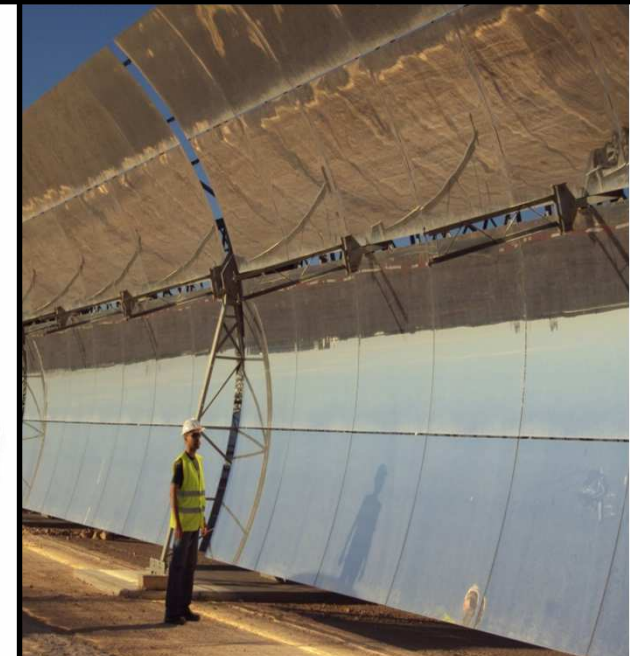
Concentrateur solaire



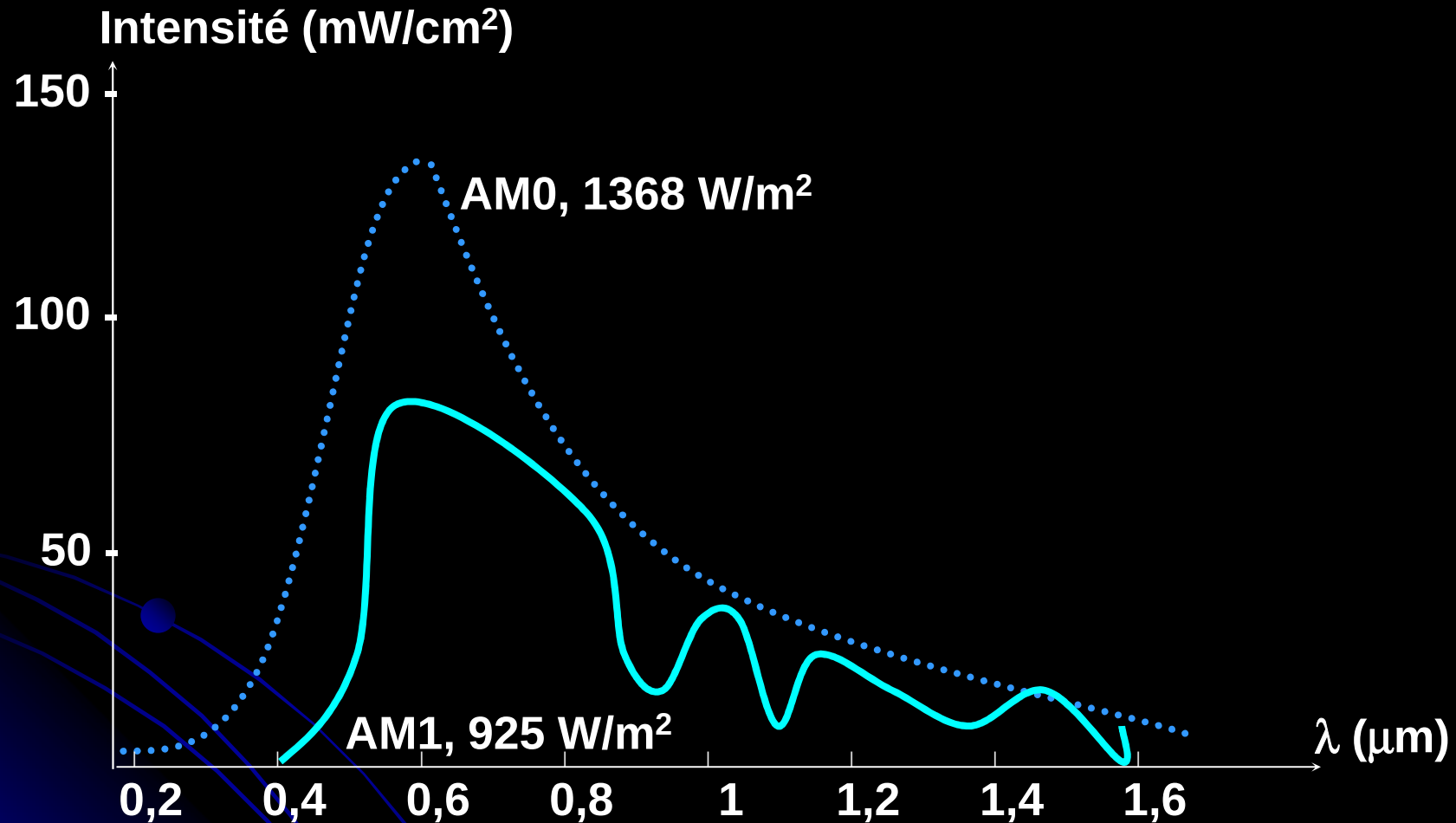
Chauffe eau solaire



Installation thermique



Energie solaire, le spectre



47% de lumière solaire (visible), 46% de lumière infrarouge (IR) et 7% de lumière ultraviolet (UV)

Energie solaire

- Le flux lumineux en provenance du soleil est de 1368 W/m^2 . C'est la quantité totale d'énergie reçue par unité de surface et de temps hors de l'atmosphère terrestre;
- La quantité d'énergie arrivant au niveau du sol est plus faible, environs 925 W/m^2 (lorsque le soleil est au zénith);
- Si l'on moyenne la puissance lumineuse reçue sur l'année, on trouve environ 20% du flux lumineux solaire et parfois moins;

Energie solaire (suite...)

- L'énergie solaire qui arrive chaque année sur terre équivaut à $1,56 \cdot 10^{18}$ kWh, soit environs 15000 fois la consommation mondiale actuelle;
- De cette énergie incidente, 30% est réfléchiée dans l'espace, 45% est absorbée, convertie en chaleur et renvoyée dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge, tandis que le reste 25% contribue à l'évaporation (22%), à la l'énergie cinétique des vents (2%), à la photosynthèse (0,06%)...

Energie solaire (suite...)

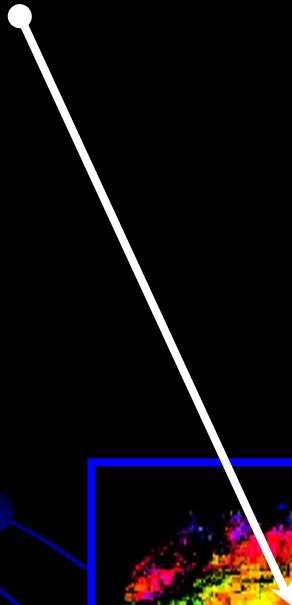
- Il arrive environ 6 kWh/m²/jour dans des déserts comme le Sahara mais moins de 1 kWh/m²/jour dans les régions polaires;
- Durée d'ensoleillement entre 2800 et 3200 heures/an
- L'énergie moyenne annuelle reçue s'élève à plus de 2000 kWh/m²
- En Algérie on a un ensoleillement de 5 kWh/m²/jour (Oran, Annaba et Alger) à 6-8 kWh/m²/jour (Bechar, Adrar et Timimoun).

Potentiel solaire de l'Algérie

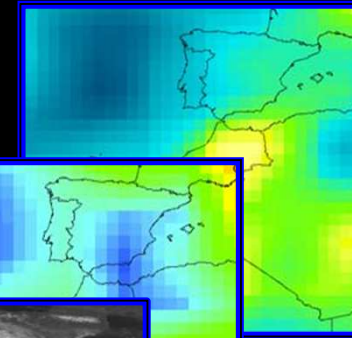
Zone	côtes	Haut Plateaux	Sahara
Surface (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçu (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650



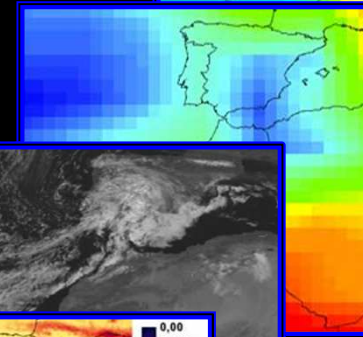
Télé captage pour évaluation des ressources solaires



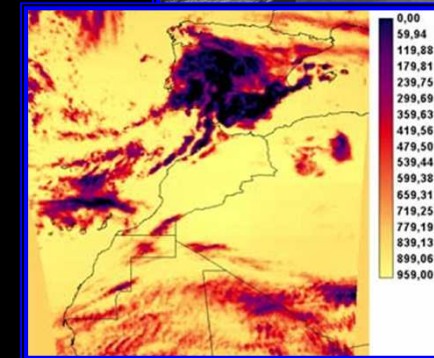
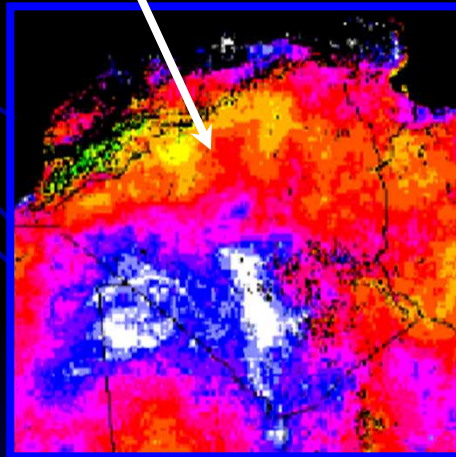
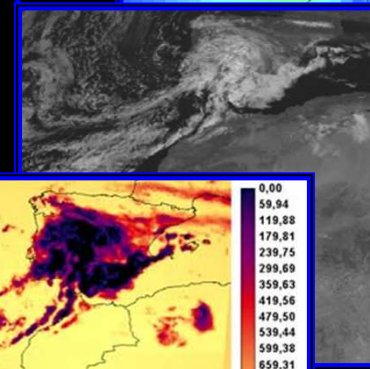
Vapeur d'eau



Aérosol

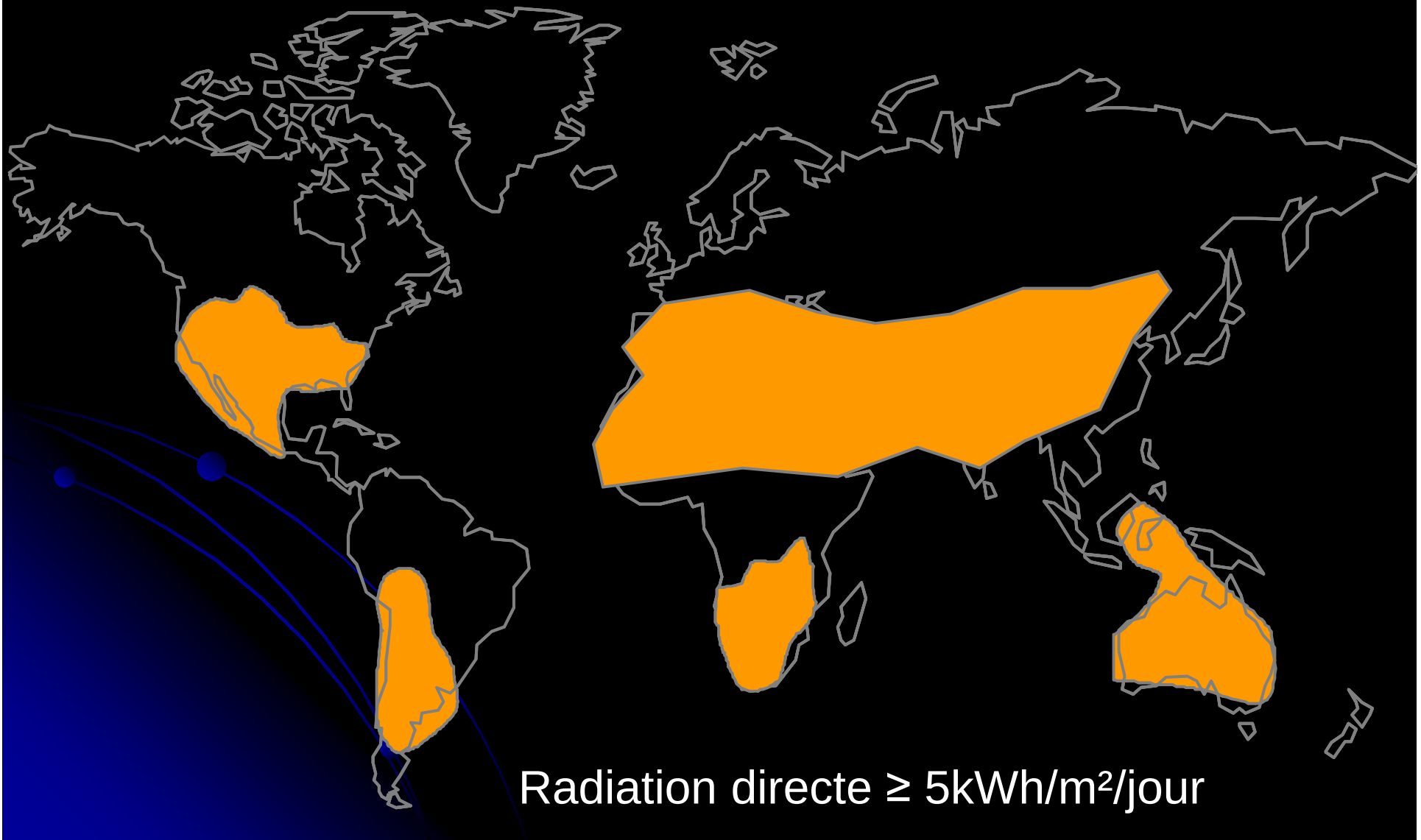


Nuages

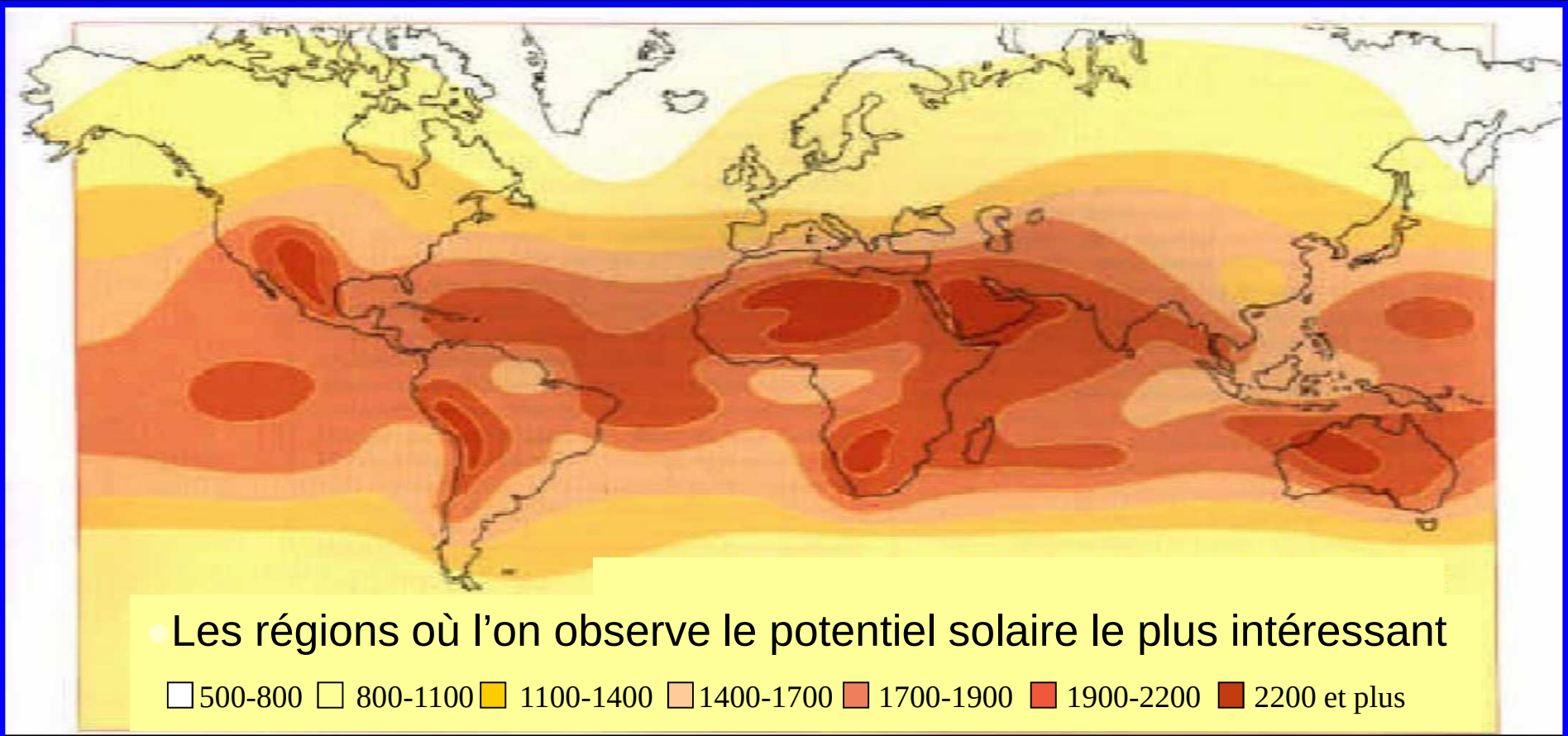


Irradiance normale
et directe à 12:00 h

Détermination des sites adaptés pour les installations solaires



Energie solaire dans le monde



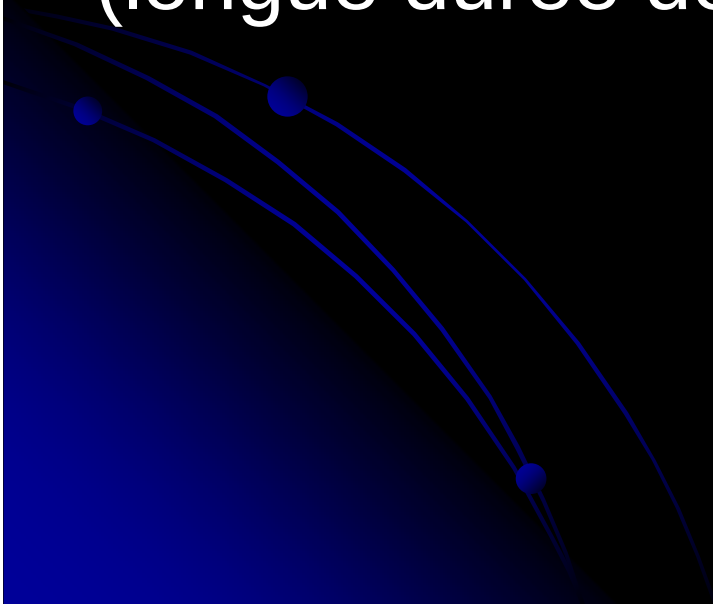
Il est clair que le monde arabe est l'endroit idéal puisqu'il se positionne au milieu du monde. En Algérie, on a un ensoleillement au Sahara de plus de 2200 kWh/m²/an

Energie solaire, les applications

- L'appellation énergie solaire est réservée au solaire photovoltaïque (PV) d'une part, et au solaire thermique (ST) d'autre part. Le solaire thermique connaît deux développements:
 - Le solaire à basse température pour l'eau chaude sanitaire et l'habitat;
 - Le solaire haute température pour la production d'électricité.
- La lumière solaire et le rayonnement infrarouge sont les éléments du rayonnement solaire qui fournissent l'énergie soit sous la forme thermique, ou photovoltaïque.

Solaire photovoltaïque

- C'est le phénomène de transformation, par effet photoélectrique, des rayonnements solaire en énergie électrique. Cellule de base pour la conversion directe des rayonnements solaires est appelée cellule solaire ou photovoltaïque (longue durée de vie)



Photovoltaïque, l'application



Solaire photovoltaïque, l'histoire

- L'effet photovoltaïque a été mis en évidence en 1839 par Becquerel en illuminant une électrode plongée dans un liquide électrolyte;
- Après la découverte de la photoconductivité du sélénium, en 1873 par Smith, ce même effet a été observé sur un matériau solide par Adams et Day, en 1877;
- La première cellule PV, construite en 1914, avait un rendement de 1%. Elle était utilisée pour réaliser des posemètres pour la photographie;

Solaire photovoltaïque, l'histoire (suite...)

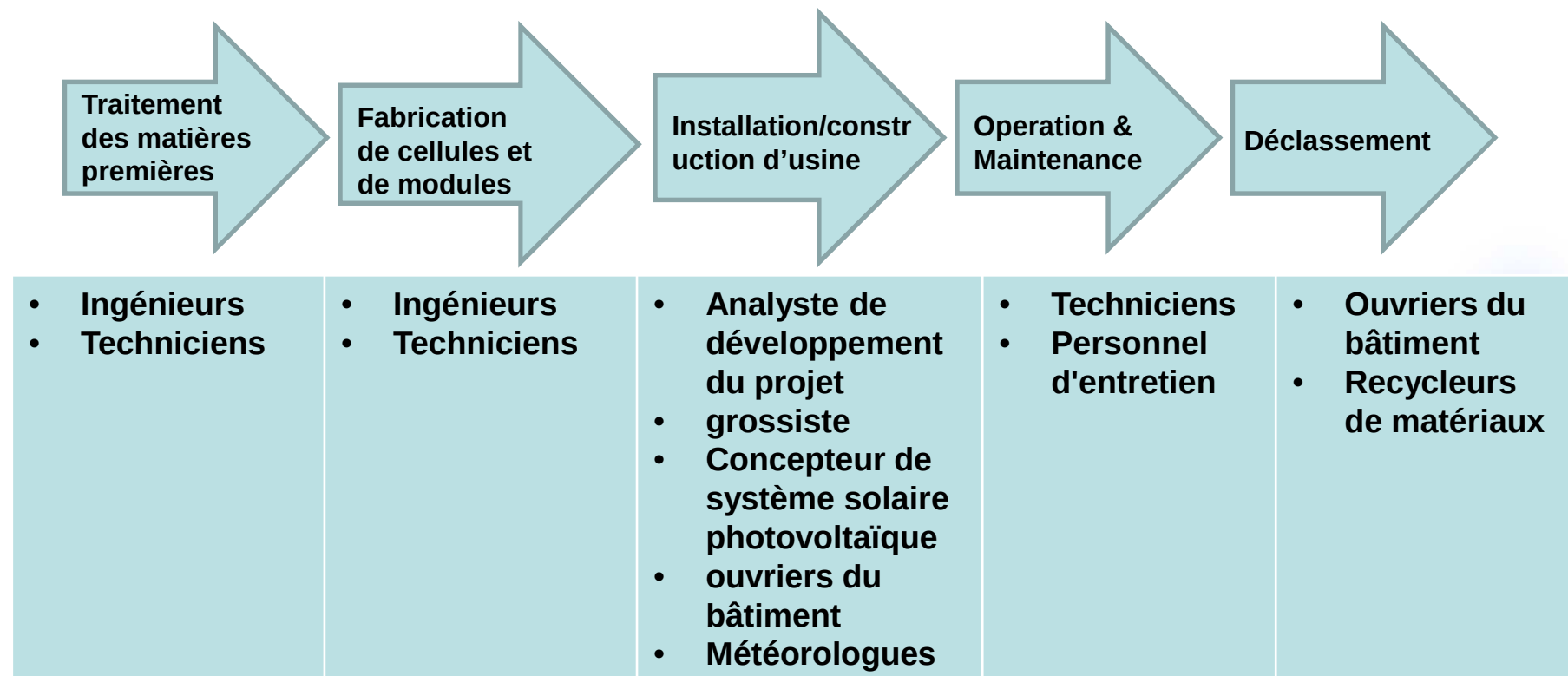
- En 1954 la production d'électricité par effet PV commence à se développer, avec la réalisation d'une cellule solaire en silicium monocristallin d'un rendement de 6%. Ce dernier augmenta rapidement pour atteindre, en laboratoire, 14% en 1958;
- Les applications ont démarré vers le début des années 1960 avec des utilisations dans les satellites, les produits grand public ainsi que les systèmes de production de l'électricité pour des sites isolés;

Solaire photovoltaïque, le présent

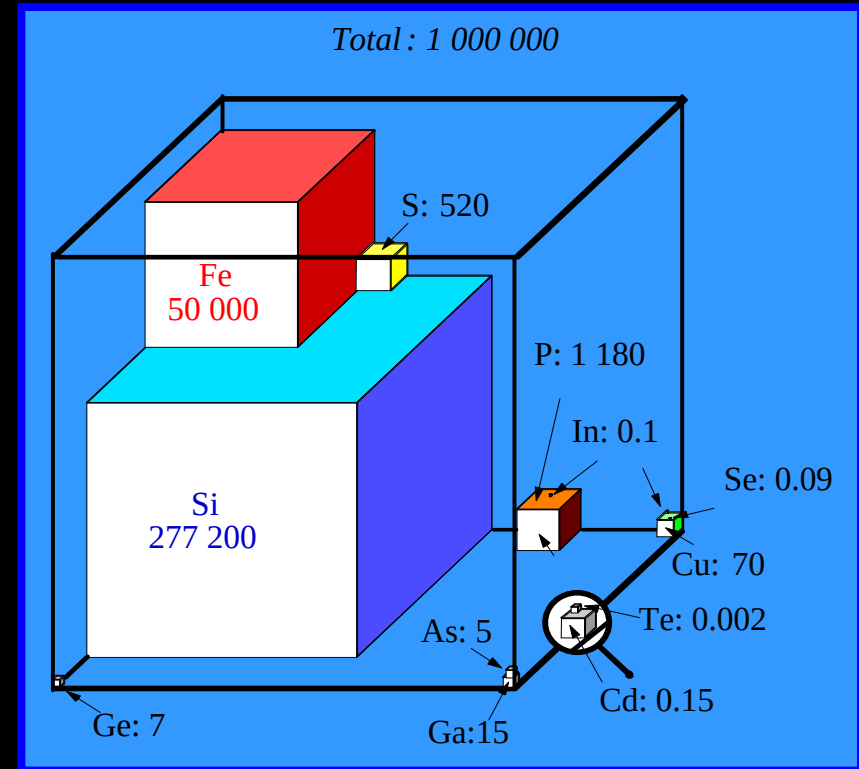
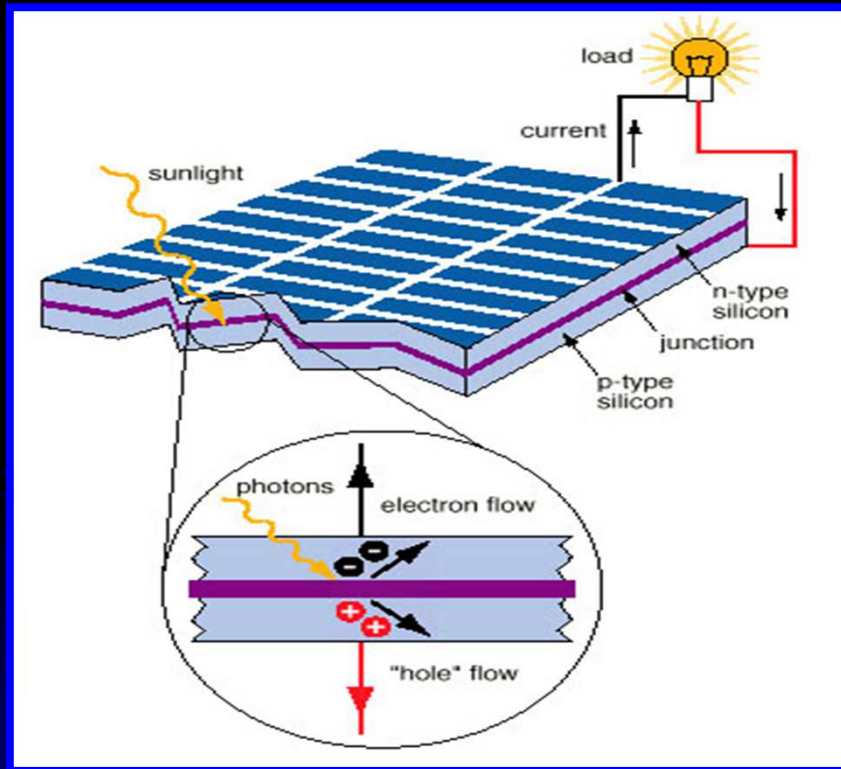
- Actuellement le rendement des panneaux solaires fabriqués industriellement varie de 13 à 18% pour le silicium cristallin, 22 à 24% pour le GaAs, 16,4% pour le CdTe à couches minces et de 7 à 8% pour le silicium amorphe;
- Le PV est essentiellement utilisé dans les satellites, engins spatiaux, dans les balises de navigation ou émetteurs de radio et télévision, la télécommunication, dans les systèmes électroniques, génération de l'électricité dans les sites isolés etc.

Technologie du combustible gratuit

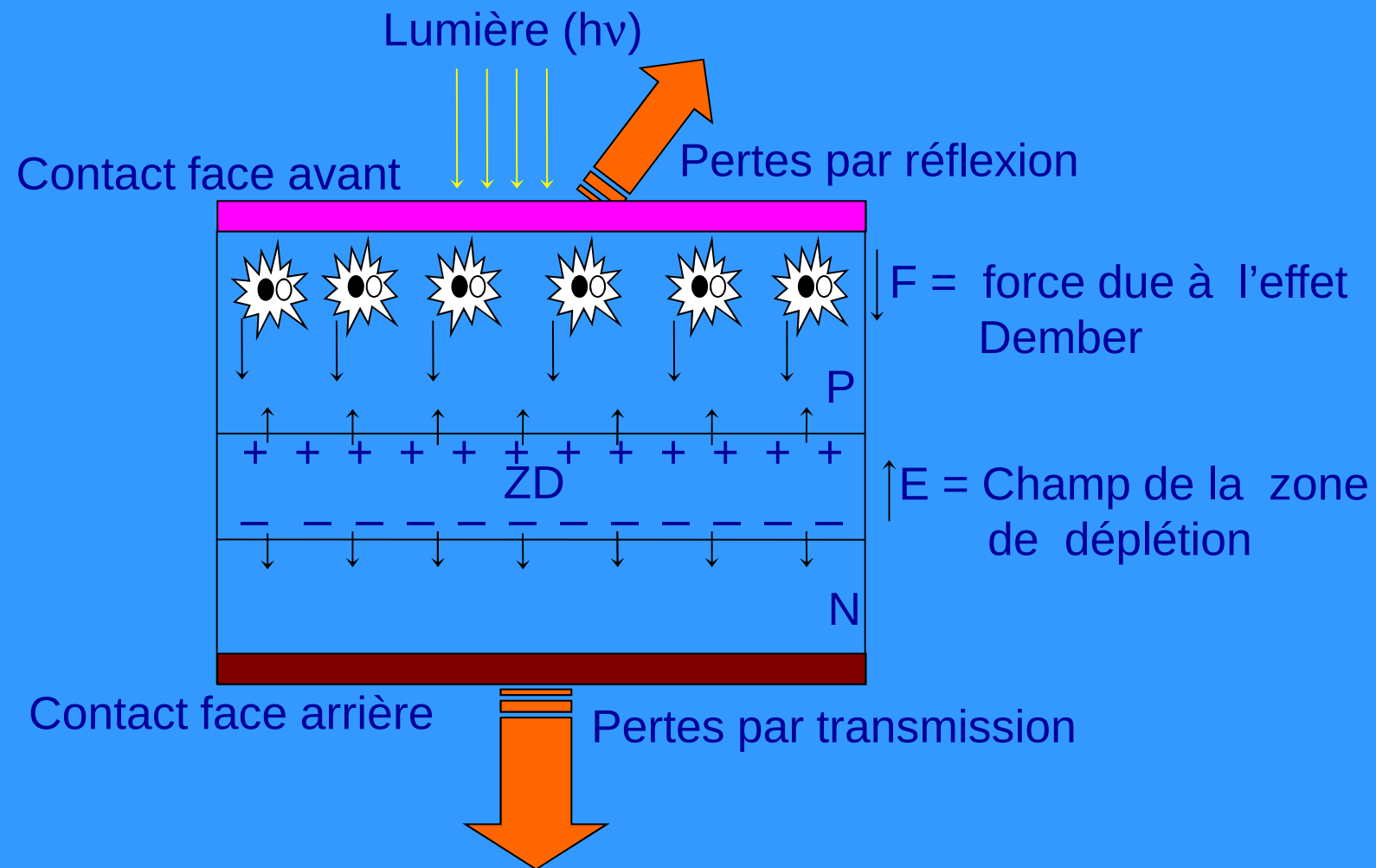
Le cas de l'industrie photovoltaïque par exemple



Composition de la Terre et Cellule solaire, noyau du PV



Cellule solaire, principe de fonctionnement



Cellule solaire, principe de fonctionnement

(suite...)

- Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis, d'autres passent au travers de la cellule et certains sont absorbés;
- Les photons absorbés dont l'énergie est légèrement supérieure à celle du gap (bande interdite) du semi-conducteur peuvent créer une paire électron-trou au voisinage de la surface éclairée (un électron dans la bande de conduction et un trou, place vide laissée par l'électron parti, dans la bande de valence);

Cellule solaire, principe de fonctionnement

(suite...)

- Les paires vont diffuser vers la face arrière de la cellule sous l'action d'une force liée à leur gradient de concentration appelé aussi effet Dember;
- Pour obtenir un courant, il faut séparer l'électron et le trou;
- Pour cela, on crée un champ électrique dans un assemblage de semi-conducteur, une diode p-n par exemple;

Cellule solaire, principe de fonctionnement (suite...)

- L'excès d'électrons dans la zone n et l'excès de trous dans la zone p créent ce champ électrique qui permet de séparer les charges générées par l'effet photoélectrique;
- Les électrons passent vers la zone où ils sont majoritaire (n) et les trous vers la zone (p);
- L'accumulation de ces charges dans la zone où elles sont majoritaires donne naissance à une différence de potentiel aux bornes de la cellule en circuit ouvert.

Photovoltaïque, rendement

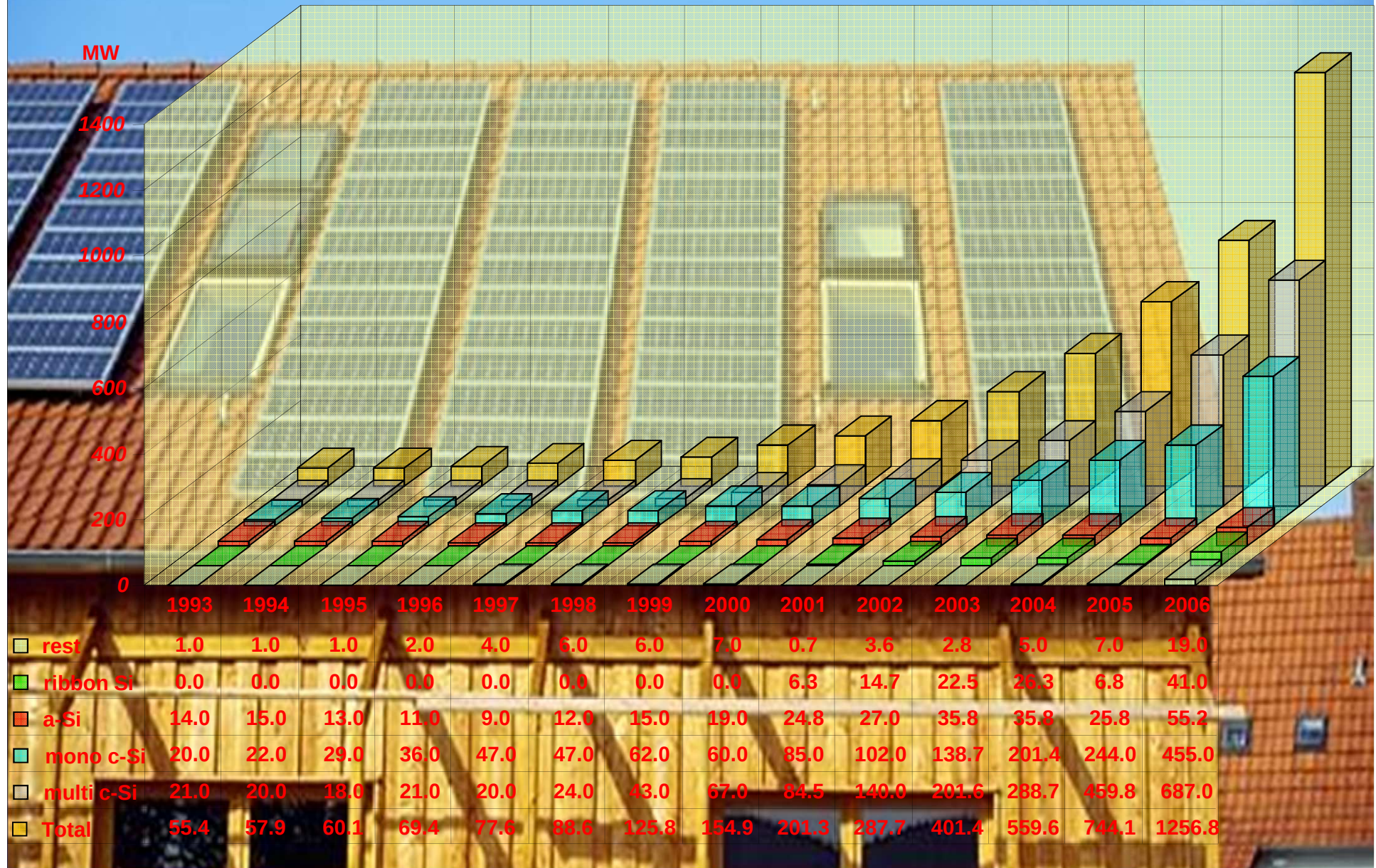
- La cellule solaire délivre une tension électrique continue de moins d'un volt et une puissance de l'ordre de 1 à 3 W;
- Les tensions utilisées sont habituellement du 12, 24 et 48 V, ce qui nécessite la mise en série de plusieurs cellules. Pour obtenir une puissance supérieure, on associe ces séries de cellules en parallèle. Ceci permet d'obtenir des panneaux solaire ayant une puissance de plusieurs dizaine de watts crête (W_c);
- Il faut noter que la puissance délivrée chute lorsque la température augmente;

Photovoltaïque, rendement (suite...)

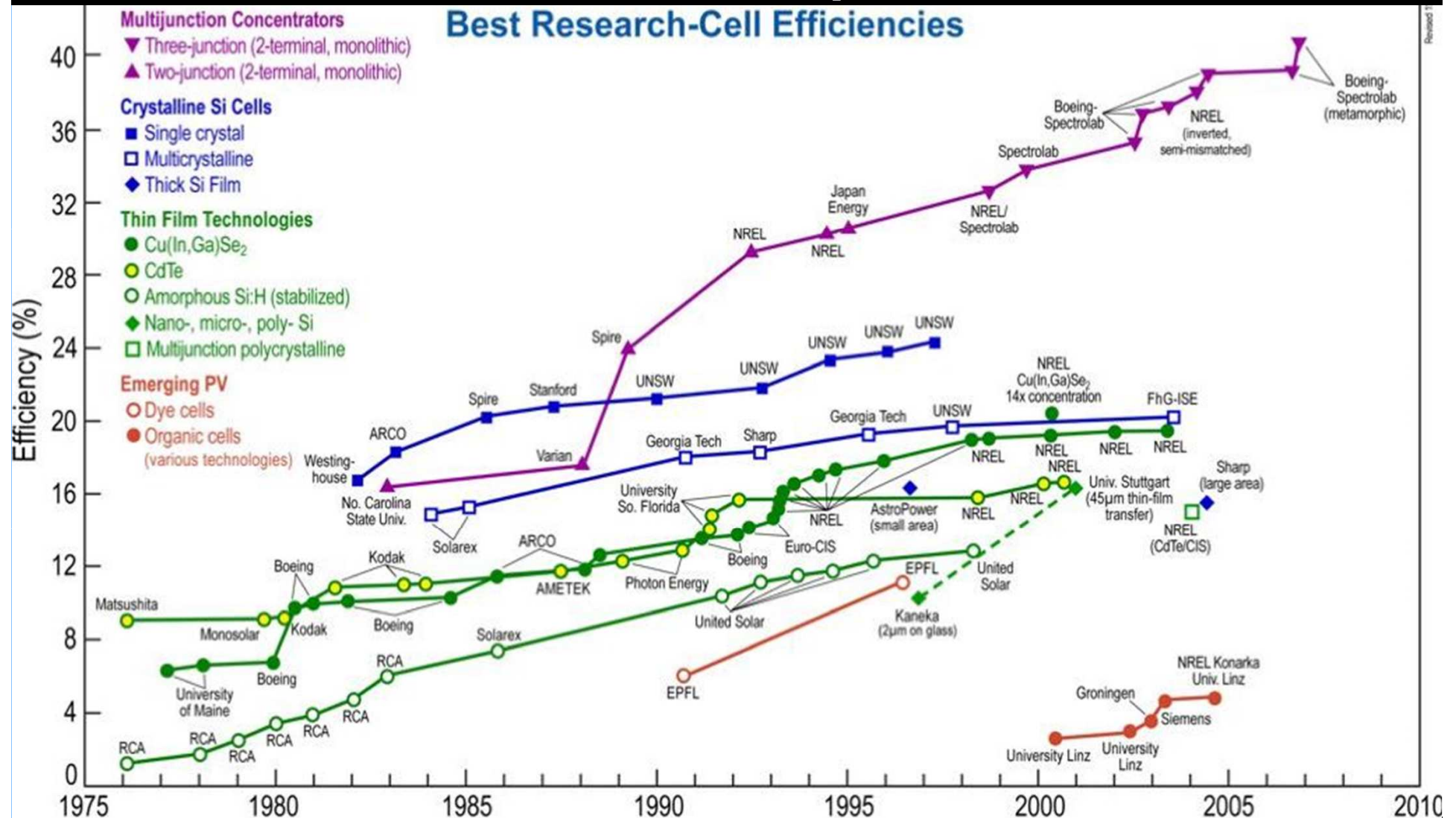
- Le rendement des panneaux solaires fabriqués industriellement varie de 13 à 18% pour le silicium cristallin, de 7 à 10% pour le silicium amorphe et jusqu'à 25% pour le GaAs;
- L'équivalent de la durée journalière à pleine puissance est de l'ordre de 3 à 4 heures par jour, soit environs 1000 à 15000 h/an. Ceci nous donne, pour un rendement de 10% et une puissance d'ensoleillement de 1 kW/m^2 , une production journalière de 300 à 400 Wh/m²/jour ou 100 et 150 kWh/m²/an. Un panneau de 1 W_c fournit généralement 1 kWh/an.

Progrès technologique des CS

Évolution moyenne du marché de la CS 1991-2003: 32%, 2004: 67%, 2012: 71%



La cellule solaire, la recherche



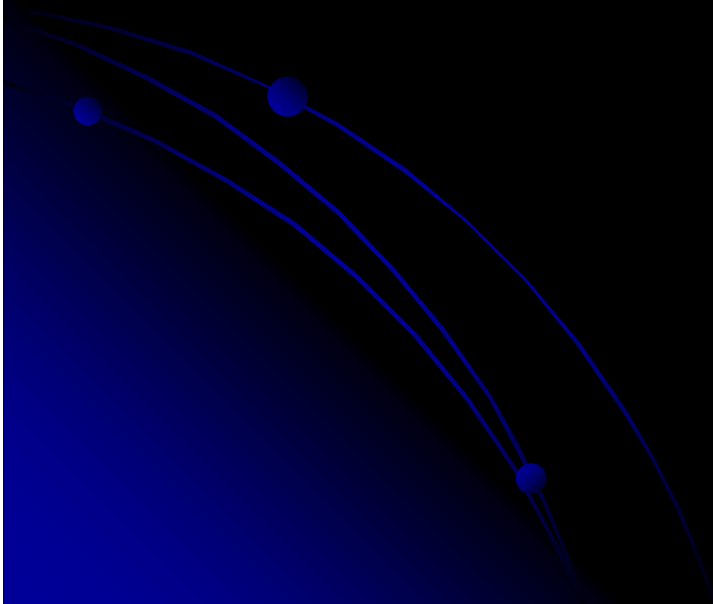
Quatre structures s'occupant des ERs existent en Algérie
 CRTSE/CDTA, UDES/CDER (ENIE= Développement des CSs)

Photovoltaïque, avantages

- La conversion directe de la lumière en électricité s'effectue donc sans pièce mobile, sans fluide sous pression, sans élévation de température, sans pollution ni production de déchets ce qui rend la cellule solaire universellement appréciable pour ses qualités écologiques et renouvelables.

Photovoltaïque, applications

- Aujourd'hui, l'industrie mondiale du photovoltaïque repose essentiellement sur les besoins des régions éloignées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse. Notons que près de trois milliards d'individus sont situés à l'écart des réseaux électriques (ONU);



Photovoltaïque, applications (suite...)

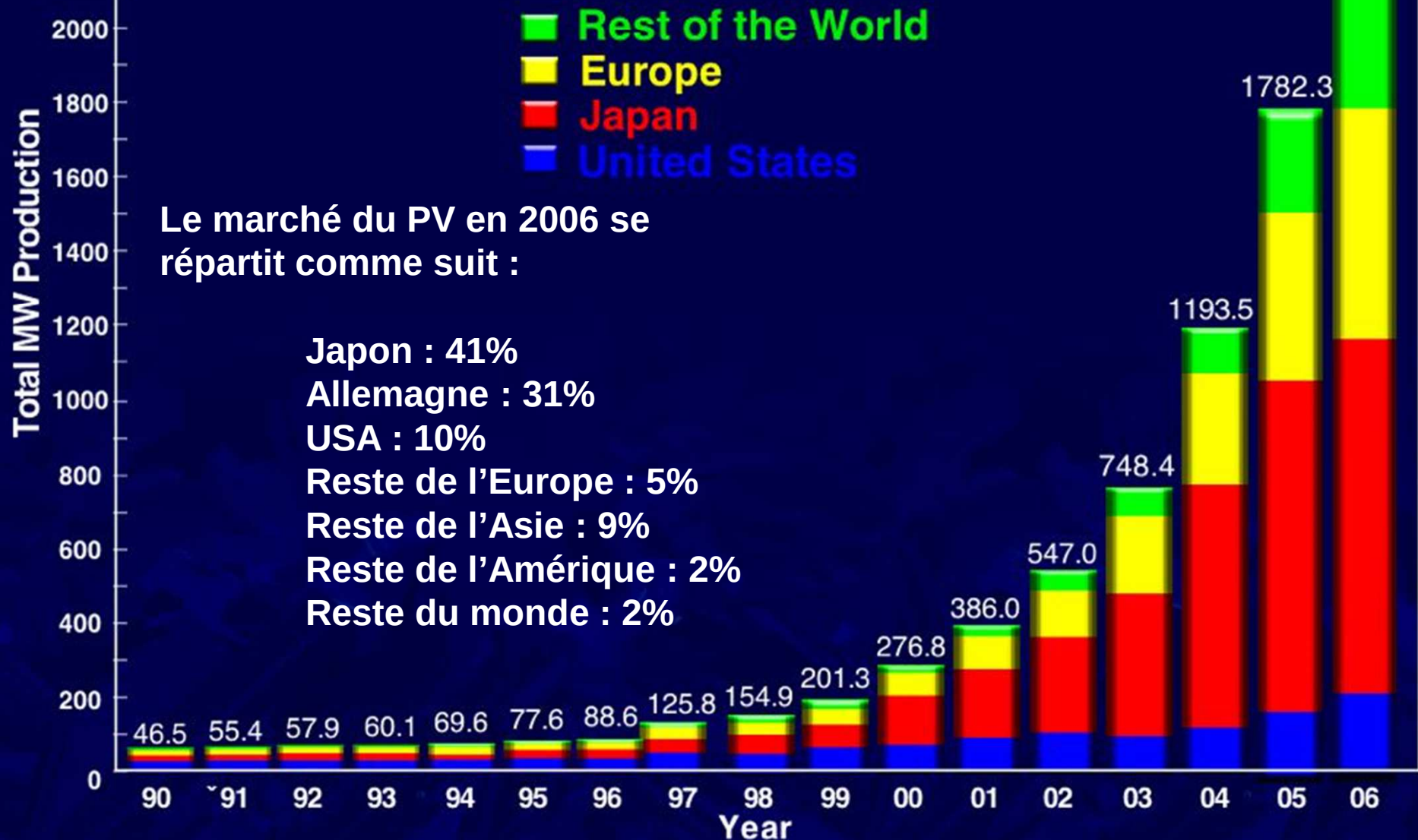
- Parmi les applications du photovoltaïque, on peut citer : les systèmes isolés alimentant des chalets ou des résidences éloignées, les aides à la navigation de la garde côtière, les sites éloignés de télécommunications des services publics et de l'armée, le pompage de l'eau dans des fermes et les postes d'appel d'urgence sur les campus ou les autoroute, les satellites, les engins spatiaux, les émetteurs de radio et télévision etc....

Photovoltaïque, production et prix

- Le photovoltaïque est en plein développement dans le monde. La demande mondiale en systèmes solaires d'alimentation électrique croît constamment depuis 15 ans.
- La production mondiale de modules PV est ainsi passée de 280 MW_c en 2000 à 1257 MW_c en 2004 et 2443 MW_c en 2005;
- Le prix du kWh, pour l'ensemble du système PV revient entre 5 et 10 €/W_c;
- Pour le PV raccordé au réseau, le prix du kWh est compris entre 0,30 et 0,60 €;
- Le PV autonome est plus cher, le prix du kWh se situe dans la fourchette de 0,75 à 1,50 €.

Production photovoltaïque

Paul Maycock, PV Energy Systems



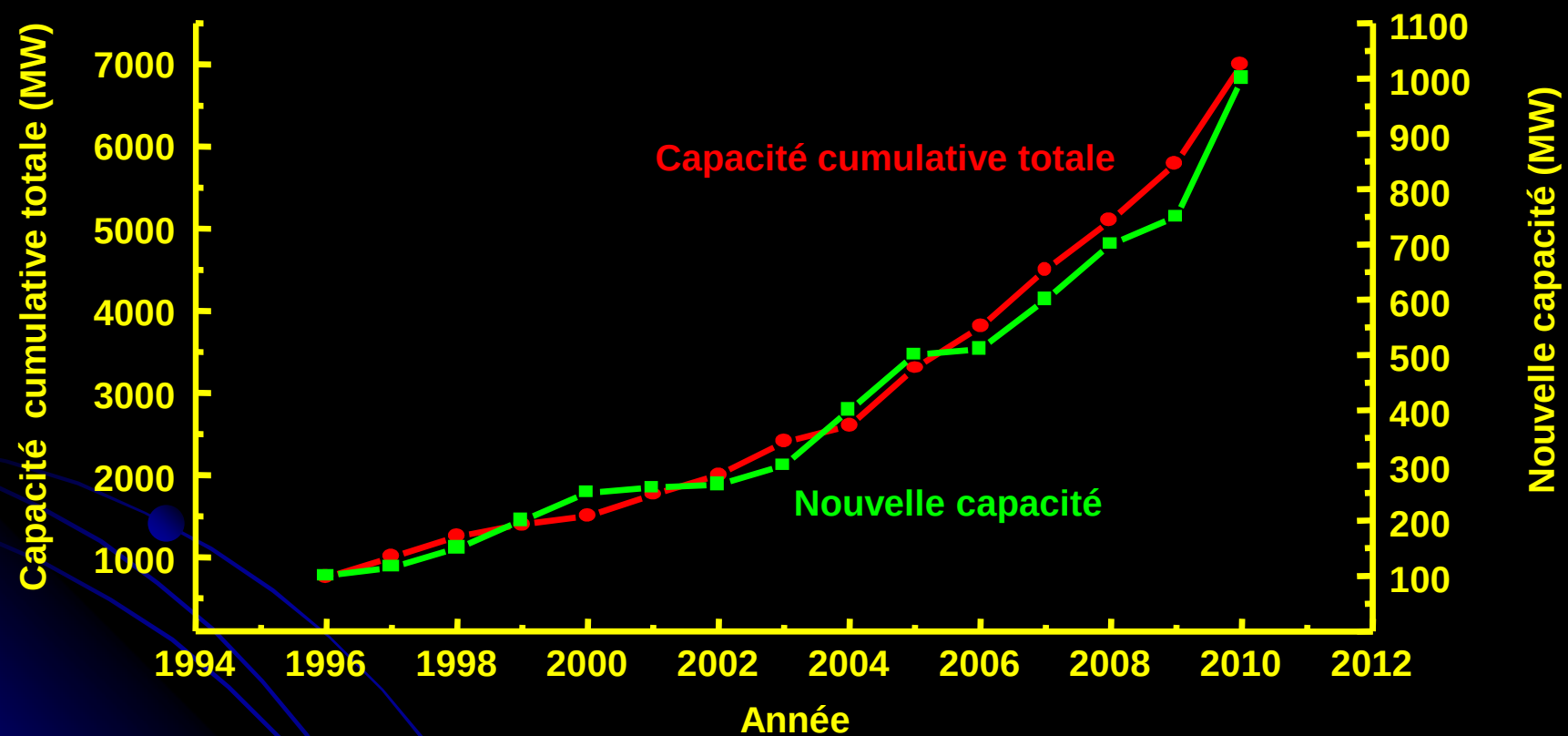
Prototype 1 d'une installation solaire



Prototype 2 d'une installation solaire

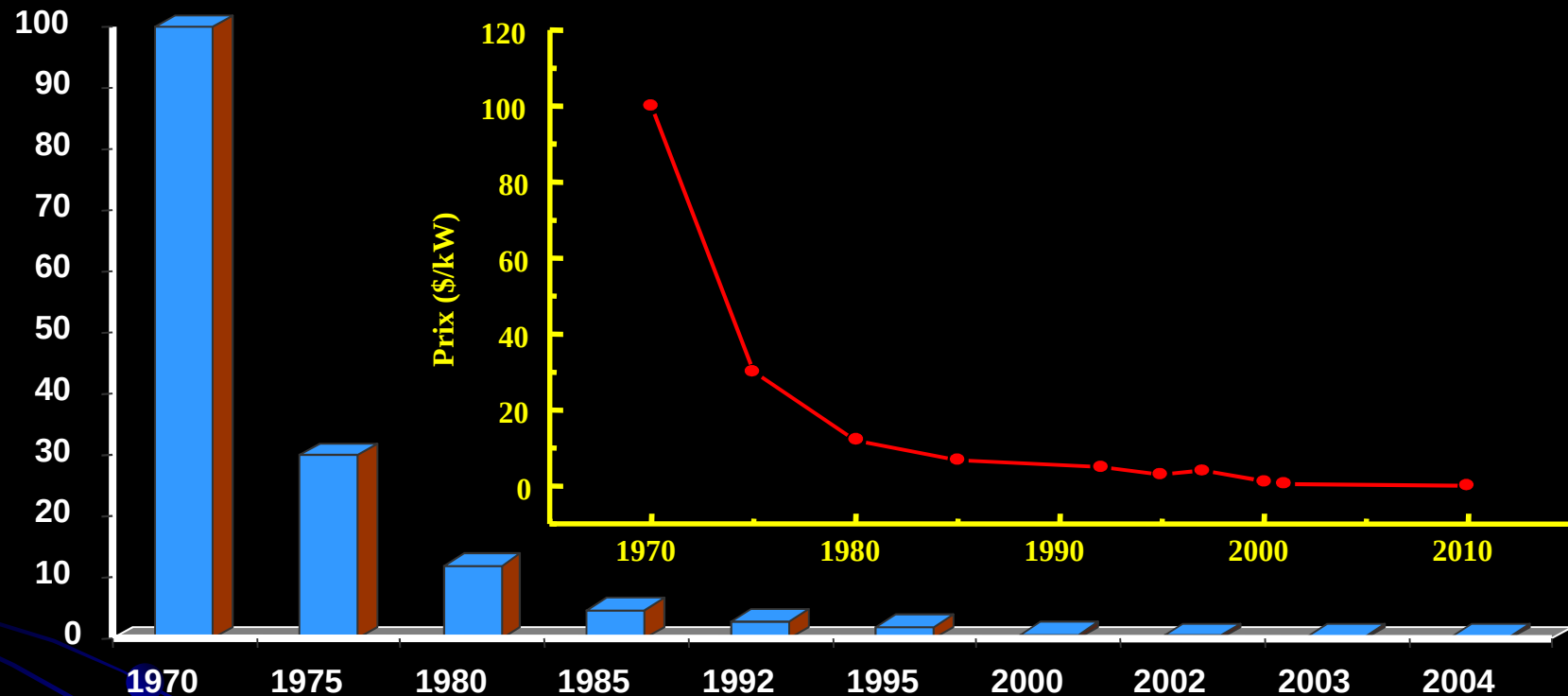


Capacité mondiale nouvelle et cumulative en PV



L'électricité produite dans le monde en 2005, grâce au PV, est de 2443 MW

Prix du Photovoltaïque (\$/kWh)



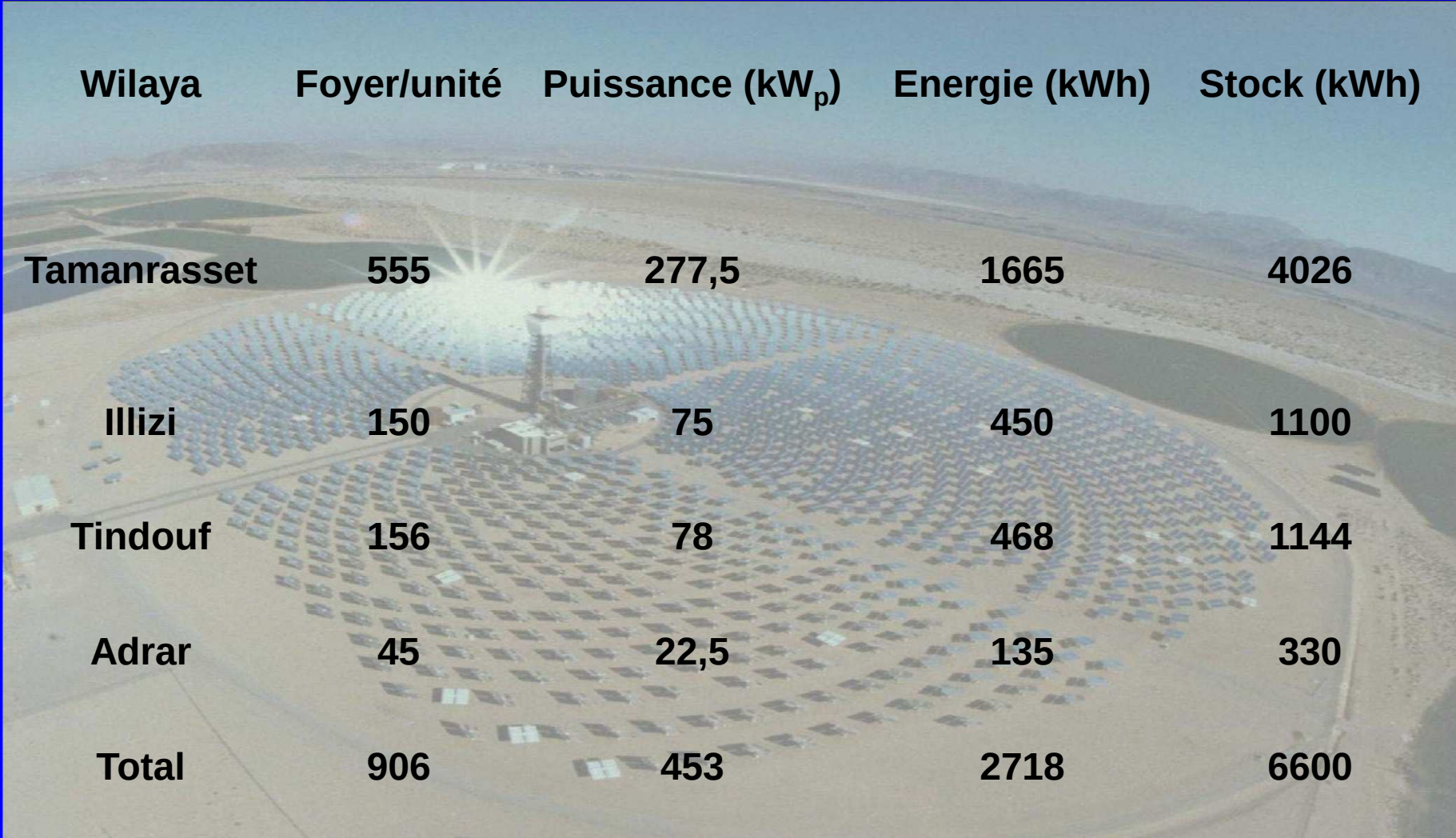
Le prix du kWh, pour l'ensemble du système PV revient entre 5 et 10 \$/Wp.
Pour le PV raccordé au réseau, le prix du kWh est compris entre 0,30 et 0,60 \$.
Le PV autonome est plus cher, le prix du kWh se situe dans la fourchette de 0,75 à 1,50 \$.

Le prix du kWh, pour le solaire thermique, est compris entre 0,09 et 0,15 \$.

Installations Algériennes en PV

Wilaya	Village	Puissance installée (kW)	Consommation (kWh/jour/foyer)
Tamanrasset	Moulay lahcen	9	1.48
	In delagh	15	0.92
	Tahifet	61.5	1.30
	Arak	61.5	1
	Amguid	51	1.60
	Tahernenet	30	1.13
	Tin tarabin	34.5	1.44
	In blel	15	1.38
Tindouf	Gara djebilet	33	1.47
	Daya el khadra	24	1.55
	Hassi mounir	21	1.68
Adrar	Hamou moussa	6	1.53
	Tala	16.5	1.61
Illizi	Imehrou	16.5	0.63
	Ifni	7.5	0.60
	Oued samen	15	0.68
	Tihahiout	12	0.57
	Tamadjart	24	0.80

Distribution par Wilaya des installations



Wilaya	Foyer/unité	Puissance (kW _p)	Energie (kWh)	Stock (kWh)
Tamanrasset	555	277,5	1665	4026
Illizi	150	75	450	1100
Tindouf	156	78	468	1144
Adrar	45	22,5	135	330
Total	906	453	2718	6600

20 000 foyers sont concernés en milieu rural pour 2010.

Photovoltaïque en Algérie

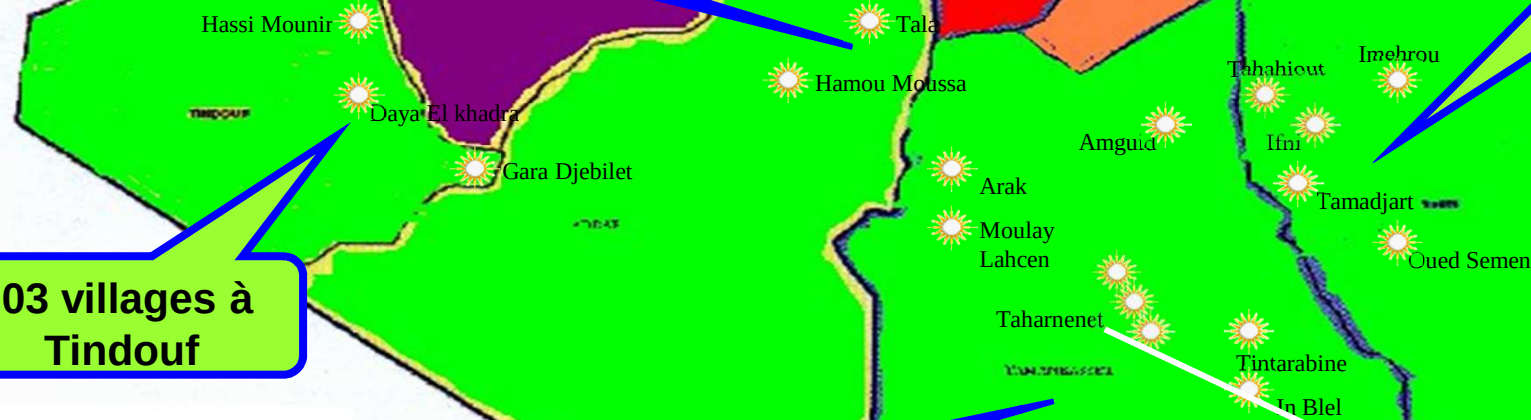


02 villages à
Adrar

05 villages à
Illizi

03 villages à
Tindouf

08 villages à Tamanrasset



Solaire thermique

- L'application la plus simple de l'énergie solaire est de l'utiliser pour chauffer un fluide dont on peut extraire la chaleur directement ou indirectement grâce à un échangeur;
- On peut aussi produire de l'eau chaude de sanitaire ou alimenter des radiateurs en portant, grâce à l'énergie solaire, ce fluide à une température de 50 à 60 °C;
- Le chauffe-eau solaire est une des utilisations de l'énergie solaire;

Solaire thermique (suite...)

- Il est aussi possible d'exploiter de manière passive l'énergie solaire grâce à des architectures de bâtiments bien pensées qui gèrent intelligemment l'apport calorifique du soleil et la déperdition de chaleur;
- Les ouvertures, la nature des vitres et l'isolation jouent un rôle important dans le bilan énergétique;
- Des matériaux appropriés permettent de stocker la chaleur obtenue lorsqu'il y a du soleil pour la réutiliser lorsqu'il n'y en a pas.

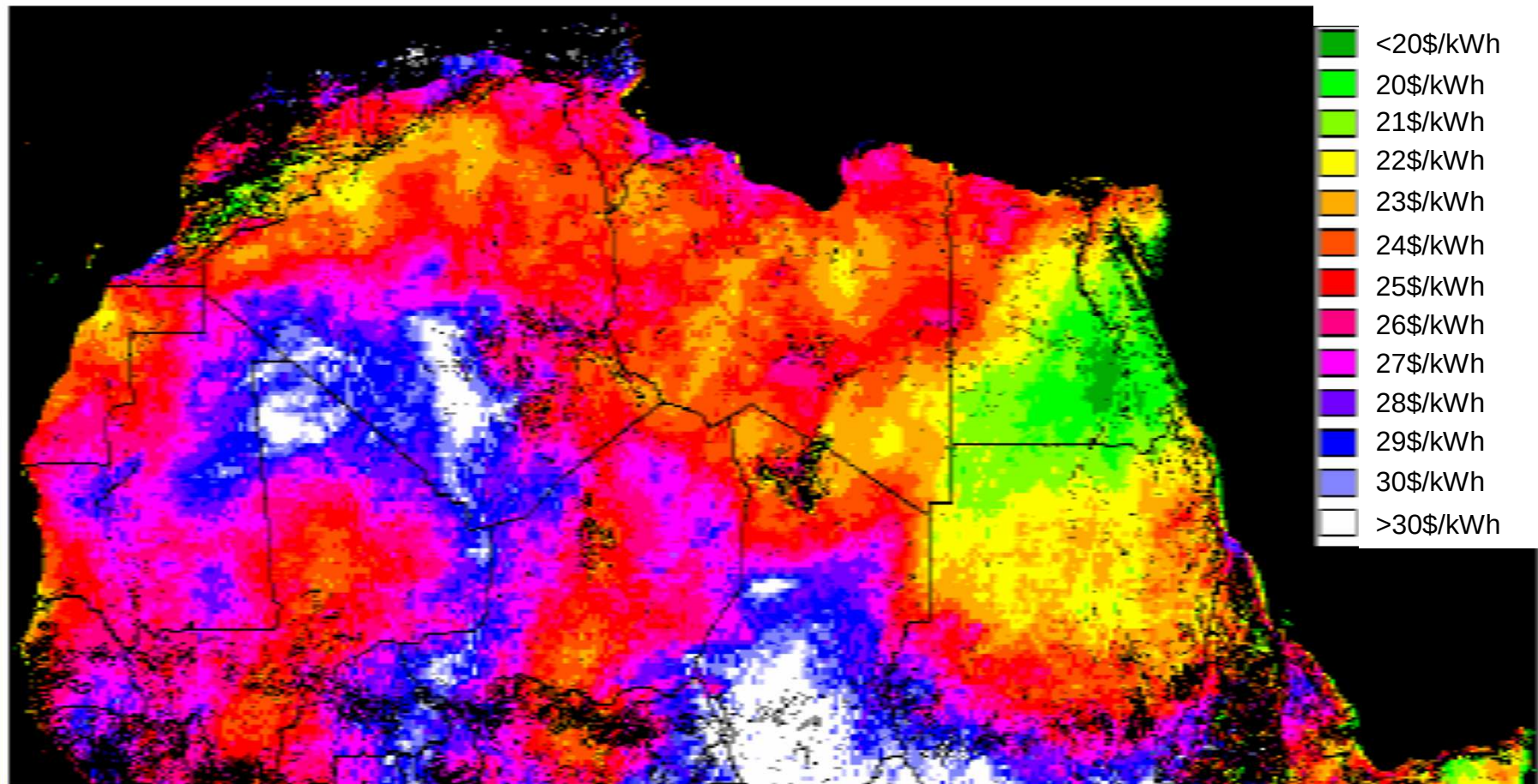
Solaire thermique (suite...)

- L'énergie solaire thermique est utilisée, également, dans des applications de production d'énergie électrique. Dans ce mode d'exploitation d'énergie thermique le rayonnement solaire est concentré pour obtenir un fluide à haute température permettant d'actionner une turbine couplée à un générateur électrique. Bien que cette technique est faisable son expansion reste modeste du fait qu'elle n'utilise que le rayonnement direct et ne fonctionne bien que dans les zones très ensoleillées.

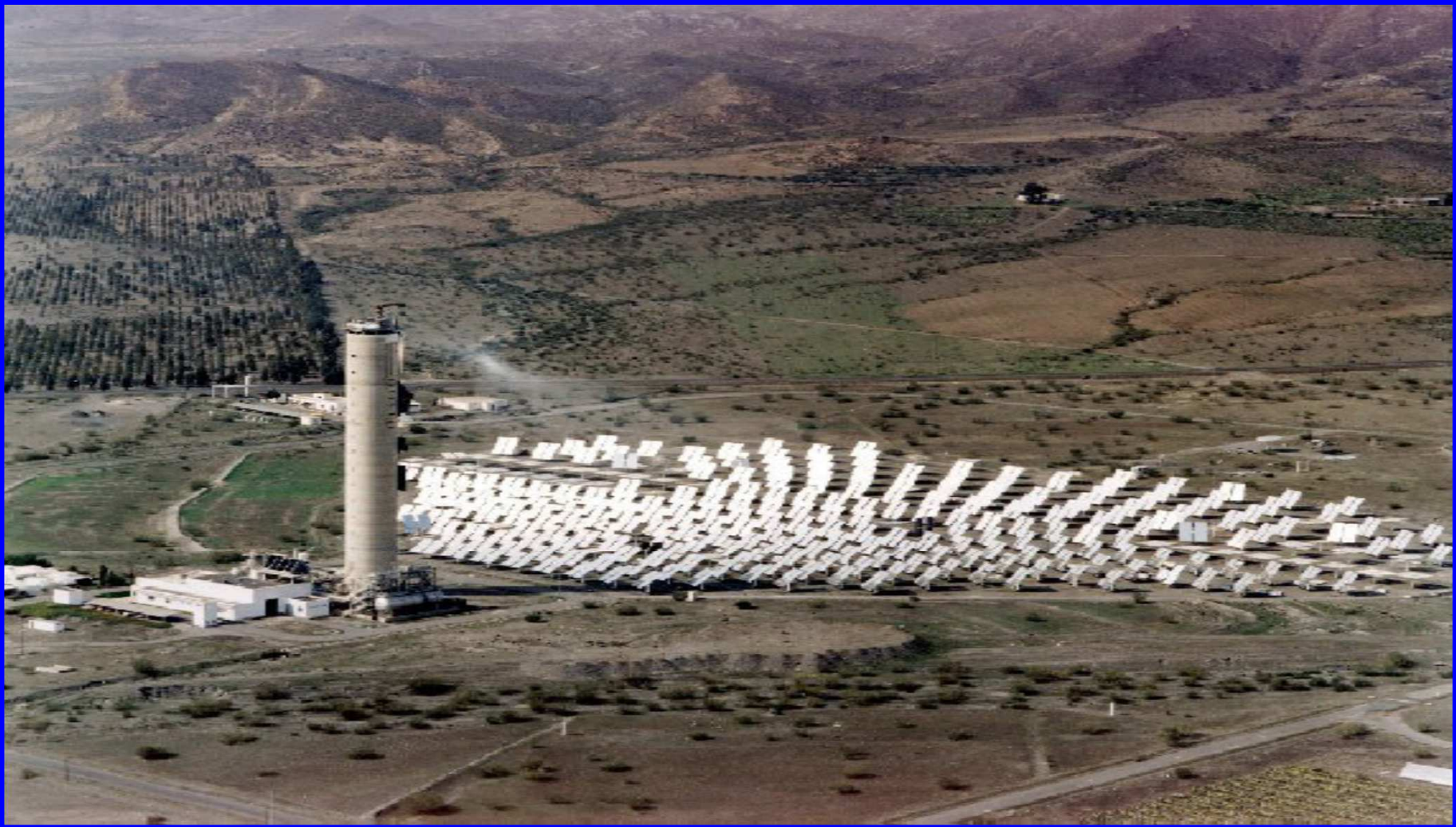
Solaire thermique, production rendement et prix

- La capacité, à l'échelle mondiale, est de 2086,3 MWt selon IEA, 2005. Elle était de 850 MWt en 1998 et 1050 en 2000;
- Les rendements, pour la production électrique, sont de l'ordre de 10 à 15% et le prix du kWh compris entre 0,09 et 0,15 €.

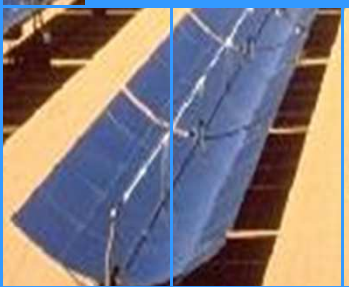
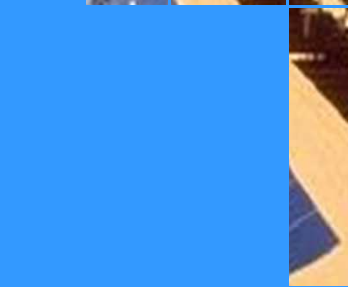
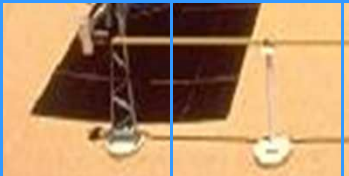
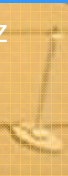
Coût de l'électricité du Solaire thermique



Prototype d'une installation solaire

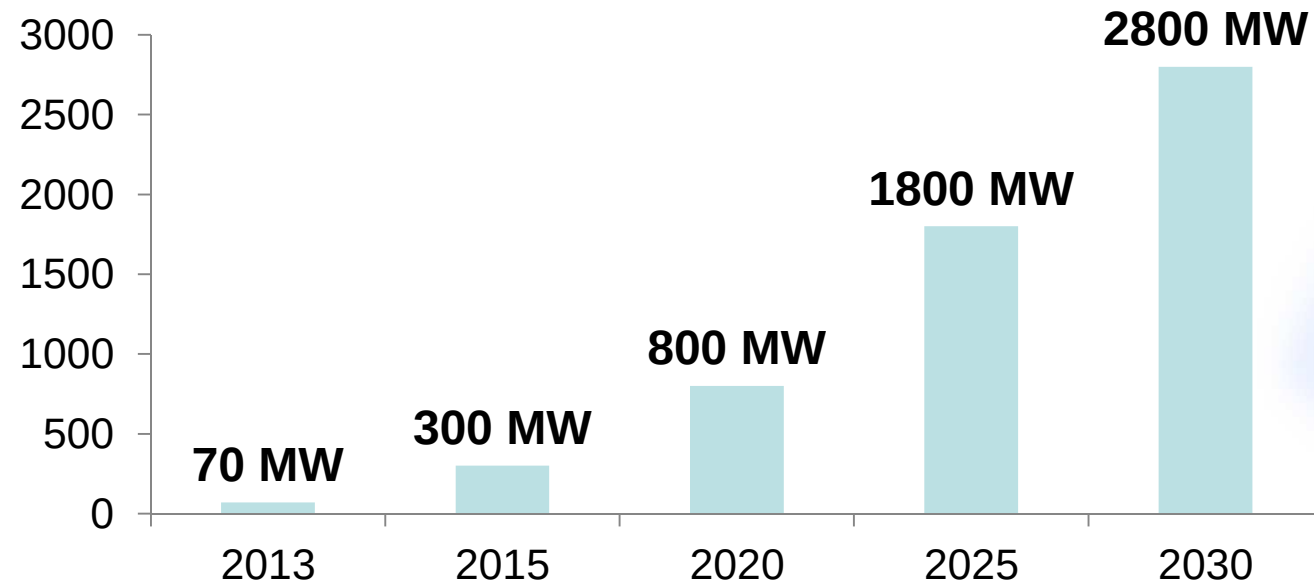


Echéancier des installations solaires thermiques en Algérie

Nom et taille du projet	2006	2007	2008	2010	2012	2015	Observation
SPP1, Hassi R'Mel 150 MW							Projet hybride solaire-gaz utilisant l'eau recyclée du champ de Hassi R'Mel
SPP2, Naama 400 MW							Projet entrant dans les perspectives de développement de la région des Hauts plateaux
SPP3, Meghaier 400 MW							Projet de développement de la région du Souff. Il est prévu aussi un dessalement de l'eau saumâtre du canal oued Rhir (120000m³)
SPP4, Hassi R'Mel 400 MW							Projet de valorisation des gaz torchés de Hassi R'Mel

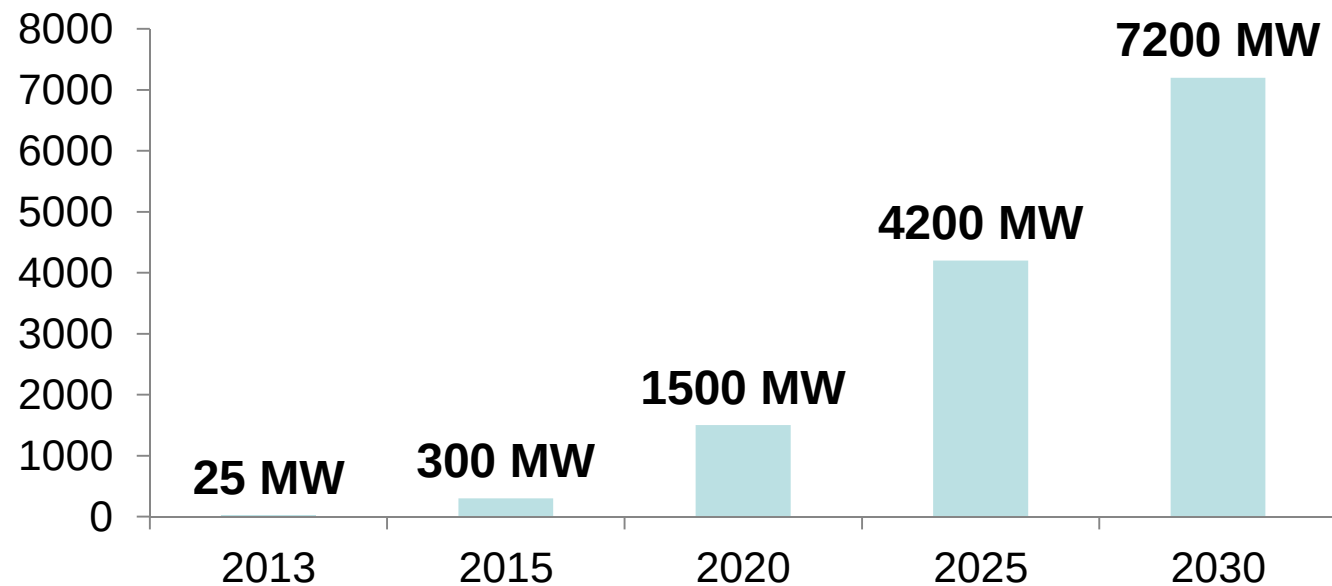
Le programme EnR par technologie

Solaire photovoltaïque (PV) Capacité à installer



Le programme EnR par technologie

Solaire thermique (CSP) Capacité à installer



Energie éolienne



Energie éolienne

- L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie connue et c'est l'énergie cinétique du vent, utilisée après conversion en énergie mécanique ou électrique.
- L'énergie éolienne, dont la production ne cesse d'augmenter et ne s'accompagne pas d'émission de gaz à effet de serre, est une solution intéressante pour remplacer les combustibles fossiles.
- Les aérogénérateurs produisant l'électricité sont parfois regroupés, notamment au USA, en Allemagne ou l'Espagne, où des groupes d'éoliennes peuvent produire jusqu'à 1 200 MW.
- Les coûts de production de ces aérogénérateurs sont largement compétitifs par rapport à d'autres générateurs.

Energie éolienne

- L'énergie éolienne provient du rayonnement solaire qui réchauffe inégalement la surface de la terre créant des inhomogénéités de température et de pression. Elle est utilisée depuis très longtemps par nos ancêtres pour la navigation à voile, pour les moulin à vent, pour pomper l'eau et moudre du grain;
- C'est l'inverse du ventilateur, l'éolienne utilise le vent pour faire tourner un rotor actionné par des pales;
- La rotation produit de l'énergie mécanique qui est ensuite transformée en énergie électrique.

Energie éolienne, historique

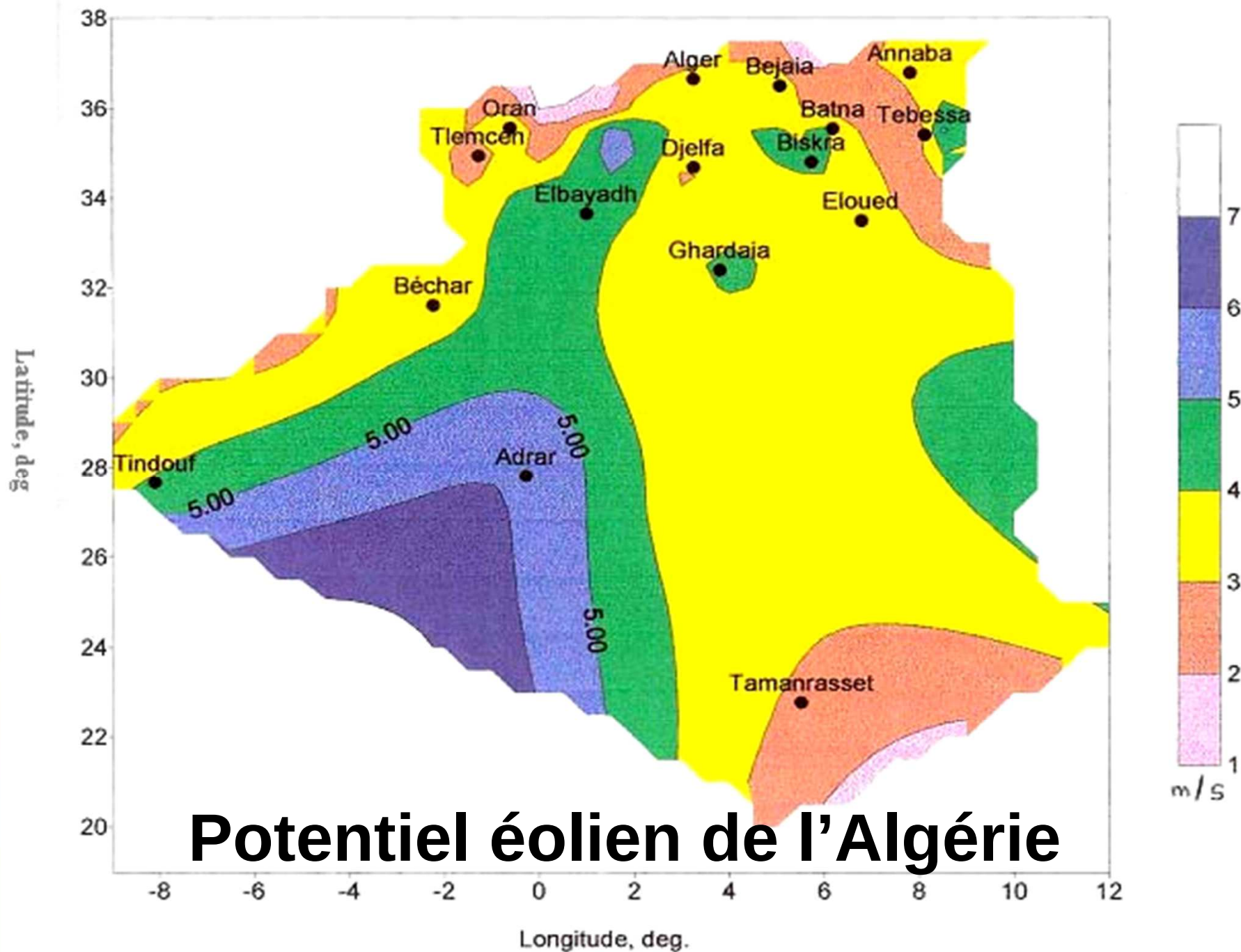
- Au V^e siècle avant Jésus on trouve, en Grèce, les premières éoliennes à axe verticale comme source d'énergie mécanique;
- Vers la même époque, on utilise des moulins à vent à axe horizontal en Égypte;
- Développement en Europe à partir du VII^e siècle et leur technologie s'est peu à peu sophistiquée pour culminer avec les moulins hollandais;
- L'idée de fabriquer de l'électricité à partir de l'énergie du vent date de 1802 (lord Kelvin);

Energie éolienne, historique (suite...)

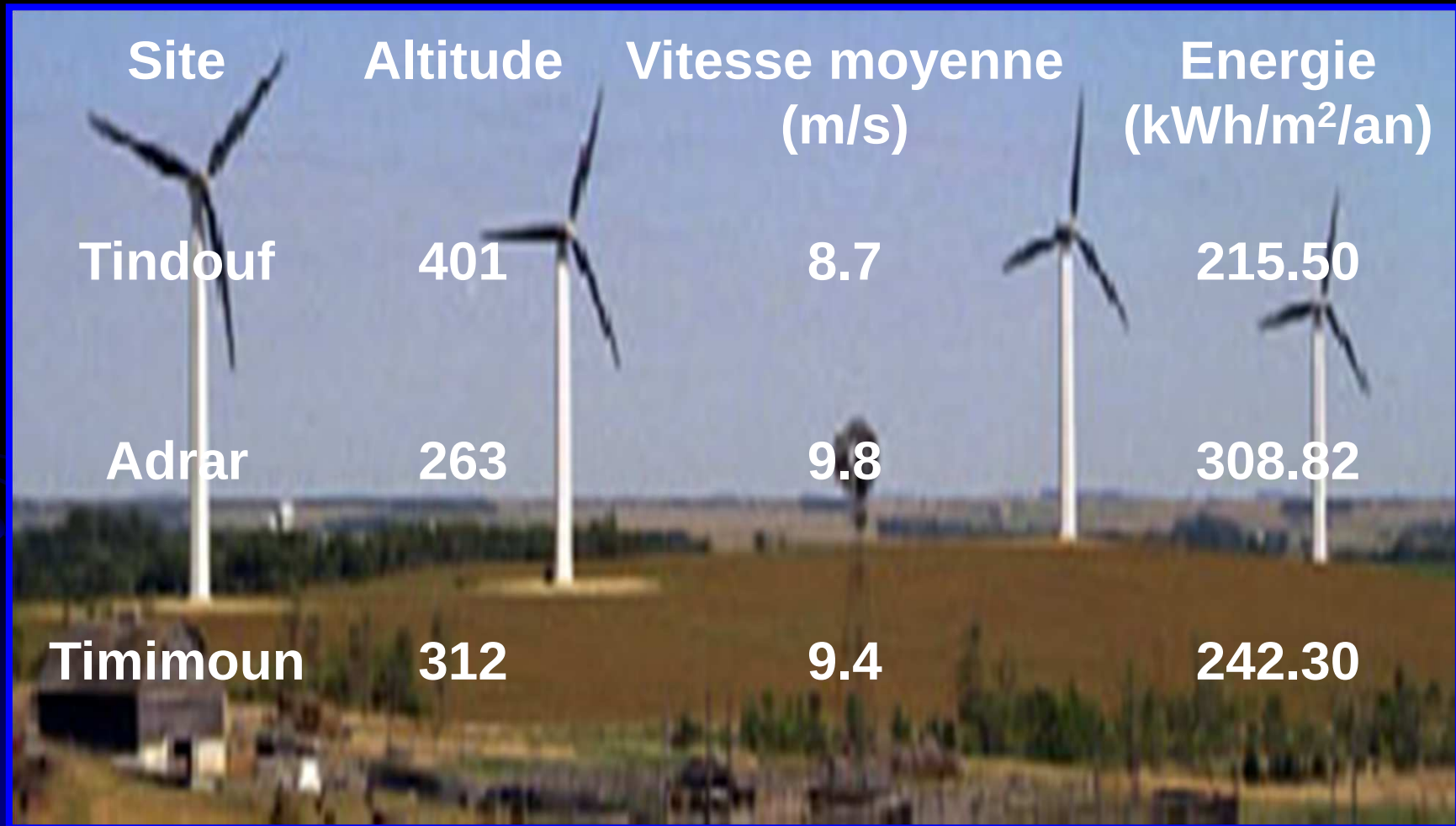
- L'invention de la dynamo, en 1850 a donné naissance au principe des éoliennes modernes;
- La Californie a lancé l'industrie éolienne moderne dans les années 1980;
- Le développement de cette filière a été intense et, depuis 1997, l'énergie éolienne mondiale connaît un taux de croissance annuel de 30%
- Le système permettant de produire de l'électricité à partir du vent est appelé aérogénérateur.

Energie éolienne (suite...)

- Les régions où l'on observe le potentiel le plus intéressant sont (vitesse du vent $> 11\text{m/s}$):
 - les côtes
 - les zones dégagées de l'intérieur
 - les rives de plans d'eau.
 - certaines régions montagneuses présentent également un grand intérêt
- Pour l'Algérie, Adrar, Timimoun et Tindouf sont particulièrement propices.



Potentiel éolien de l'Algérie



Site	Altitude	Vitesse moyenne (m/s)	Energie (kWh/m ² /an)
Tindouf	401	8.7	215.50
Adrar	263	9.8	308.82
Timimoun	312	9.4	242.30

Energie éolienne, la production

- La production mondiale d'électricité était en 1980 de seulement 10 MW, 6 GW en 1997, 25 GW en 2005 et 33 GW en 2006;
- Soit une augmentation globale d'environ 35%. 60% en Europe, 50% au USA, 15% en Asie et environ 2% en Afrique;
- L'intérêt de l'énergie éolienne en Algérie se traduit par la création du groupe **NEAL** (2002), en collaboration avec Sonatrach, Sonelgaz et le groupe SIM, dont le rôle est d'identifier et de réaliser les projets liés au développement et à l'exploitation d'énergie nouvelles et renouvelables tel que le vent.
- Le potentiel éolien en Algérie est de 35 TWh/an

Energie éolienne (suite...)

- Il existe deux grands types d'éolienne:
 - Celle dont l'axe de rotation est horizontal par rapport à la direction du vent et
 - Celle dont l'axe de rotation est vertical
- Les aérogénérateurs les plus répandus, car leur rendement est meilleur, appartiennent à la première famille;
- La simplicité n'est qu'apparente car elle exige des mécanismes de fonctionnement complexes. Les matériaux doivent être très résistants à cause de la vitesse du vent qui peut varier dans une large gamme.

Energie éolienne (suite...)

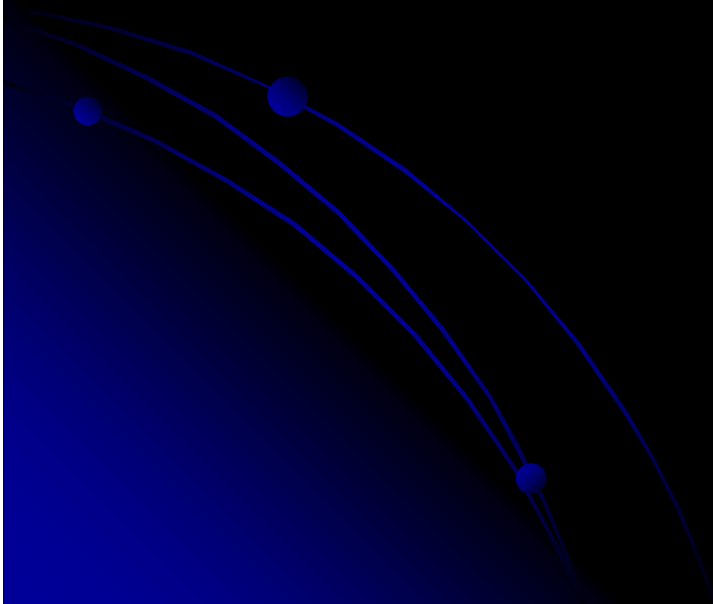
- L'énergie que peuvent capter les éoliennes, dépend en grande partie de la vitesse moyenne du vent à l'échelle locale. L'énergie augmente d'environ 20% pour chaque augmentation de 10% de la vitesse du vent;
- La puissance maximale (W/m^2), que l'on peut obtenir pour un vent de vitesse V (m/s) est
 - $P = 0,37V^3$ (15°C et 1013 mb);
- Pour une hélice de diamètre d balayant une surface S , la puissance (W) de l'éolienne vaut $P = 0,37SV^3 = 0,37(\frac{1}{4}\pi)d^2V^3 = 0,29d^2V^3$;

Energie éolienne (suite...)

- Le contrôle de vitesse d'une éolienne intervient à partir de $V = 15 \text{ m/s}$. On arrête son fonctionnement à 25 m/s sinon elle risque d'être endommagée;
- Le problème majeur du vent est son instabilité. Par conséquent et pareillement au solaire, il est difficile d'utiliser l'éolienne comme seule source d'énergie, ou alors il faut disposer de moyens de stockage;
- Une éolienne fonctionne de l'ordre de 1550 à 3500 h/an (suivant les sites) à puissance nominale.

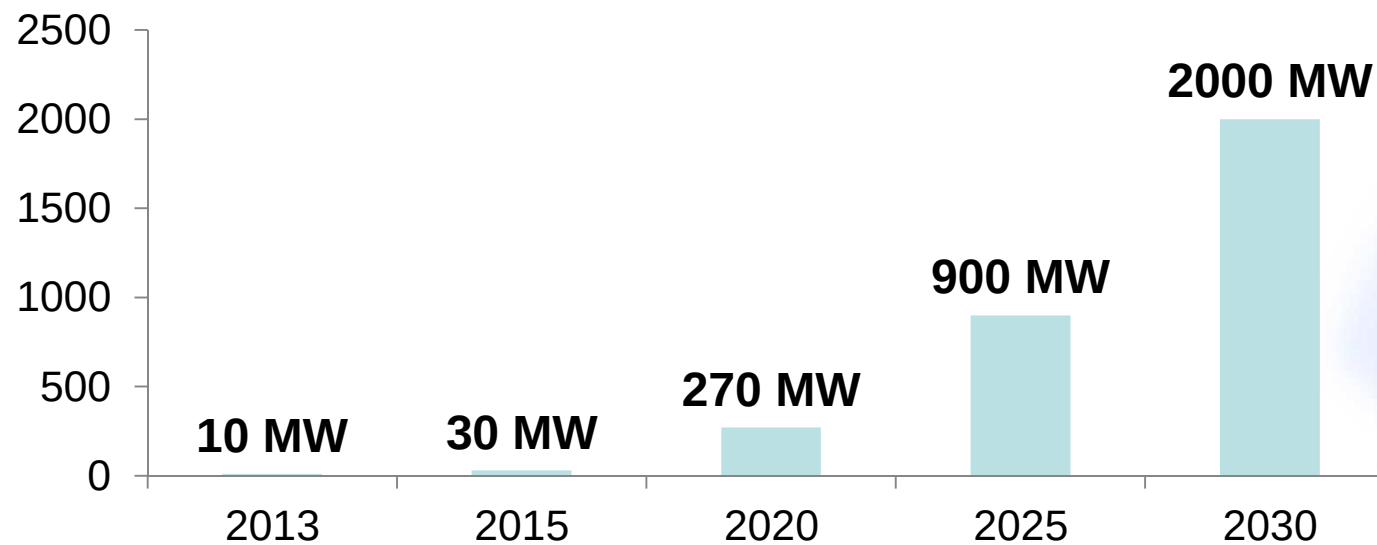
Energie éolienne, le prix

- Le coût du kWh est modéré, de l'ordre de 0,05 à 0,12 €.



Le programme EnR par technologie

Centrales éoliennes Capacité à installer



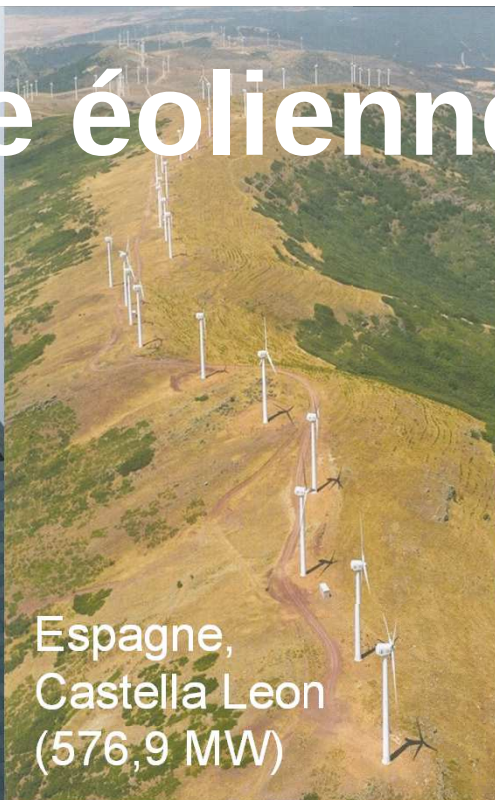
Echéancier des installations éoliennes en Algérie

Nom et taille du projet	2006	2007	2008	2010	2012	2015	Observation
WPP1, Tindouf 6 MW							Projet d'une ferme éolienne
WPP2, Tindouf 10 MW							Projet d'une ferme éolienne
WPP3, Timimoun 10 MW							Projet d'une ferme éolienne
WPP4, Bechar 10 MW							Projet d'une ferme éolienne

Energie éolienne, l'exemple



Bahreïn (800 kW)



Espagne, Castella Leon
(576,9 MW)



Egypte, golfe de Suez
(85 MW)



Angleterre (80 MW)



Tunisie, Tunis (20 MW)



Jordanie, Hofa
(1.125 MW)



Maroc (20 MW)



USA, Texas
(700 MW)

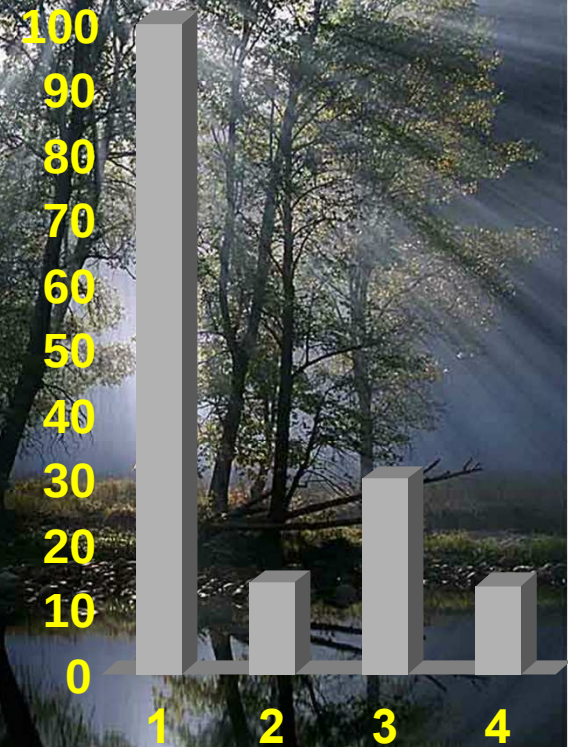
La biomasse dans le monde

- C'est une source importante d'énergie représentant une production de 8 fois la consommation annuelle mondiale d'énergie à partir des autres sources restantes;
- L'énergie de la biomasse désigne l'énergie pouvant être extraite directement, ou indirectement, de matériaux biologiques. Le bois, les déchets agricoles, le fumier et les ordures ménagères restent les principales sources d'énergie dans beaucoup de pays en voie de développement. On cherche aussi à y cultiver des végétaux à croissance rapide et à fort rendement, dont la biomasse peut être exploitée (canne à sucre, maïs, colza...);

Energie de la biomasse



- 1= Production théorique de la biomasse
- 2= Utilisation mondiale de la biomasse
- 3= Utilisation mondiale de l'énergie
- 4= Utilisation mondiale du pétrole



La biomasse (suite...)

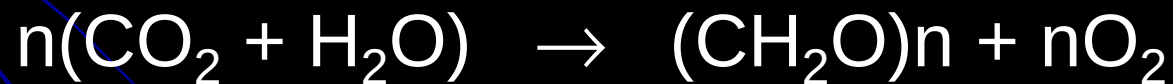
- La biomasse est utilisée pour produire des combustibles liquides ou gazeux, générer de la chaleur ou de l'électricité ou encore les deux;
- L'énergie est dérivées de matières d'origine végétale et organique appelé bio-combustible (bois et ses déchets, les herbes, les arbrisseaux, les résidus de l'agriculture, les excréments des animaux et même les déchets ménagers de nature organique);
- Elle représente environ 16% du bilan énergétique mondial

La biomasse (suite...)

- Les végétaux accumulent, lors de leur croissance, de l'énergie dans des liaisons chimiques carbone-hydrogène par le processus de photo-synthèse que l'on peut représenter sous la forme simplifiée suivante:



$h\nu$



- Le gaz carbonique et l'eau sont ainsi transformés en hydrate de carbone et en oxygène.

La biomasse, production

- Le plus grand projet de la biomasse est celui de New York (capacité de production 200,000 m³/jour d'alcool à partir du maïs) suivi de l'Allemagne avec plus de 70 projets, U.K. avec 35 projets et plus de 30 MW de puissance électrique. Le Brésil est l'un des pays principaux dans la production de l'alcool par la biomasse (à partir de la canne à sucre) soit environ 13 millions de tonnes par année pour faire circuler environs trois millions de voitures.

La biomasse, production (suite...)

- La biomasse est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée actuellement dans les pays arabes (environ 50 million d'habitants, représentant 5-6 % de leur consommation d'énergie totale);
- L'efficacité de la biomasse dans les pays arabes peut être améliorée en optant à l'insertion de la technologie moderne dans la production du bio-gaz.

Potentiel de la biomasse en Algérie

La biomasse est loin d'être négligeable en Algérie. Elle représente aujourd'hui un potentiel de 3.7 millions de TEP sous la forme de bois de forêt et 1.33 million de TEP/an provenant des déchets végétaux et urbain (365 kg de déchet urbain/algérien). Cependant, cette énergie est loin d'être exploitable en Algérie faute de moyens techniques sophistiqués et du fait qu'on est loin de la compétitivité économique (gaz naturel).

Energie géothermale



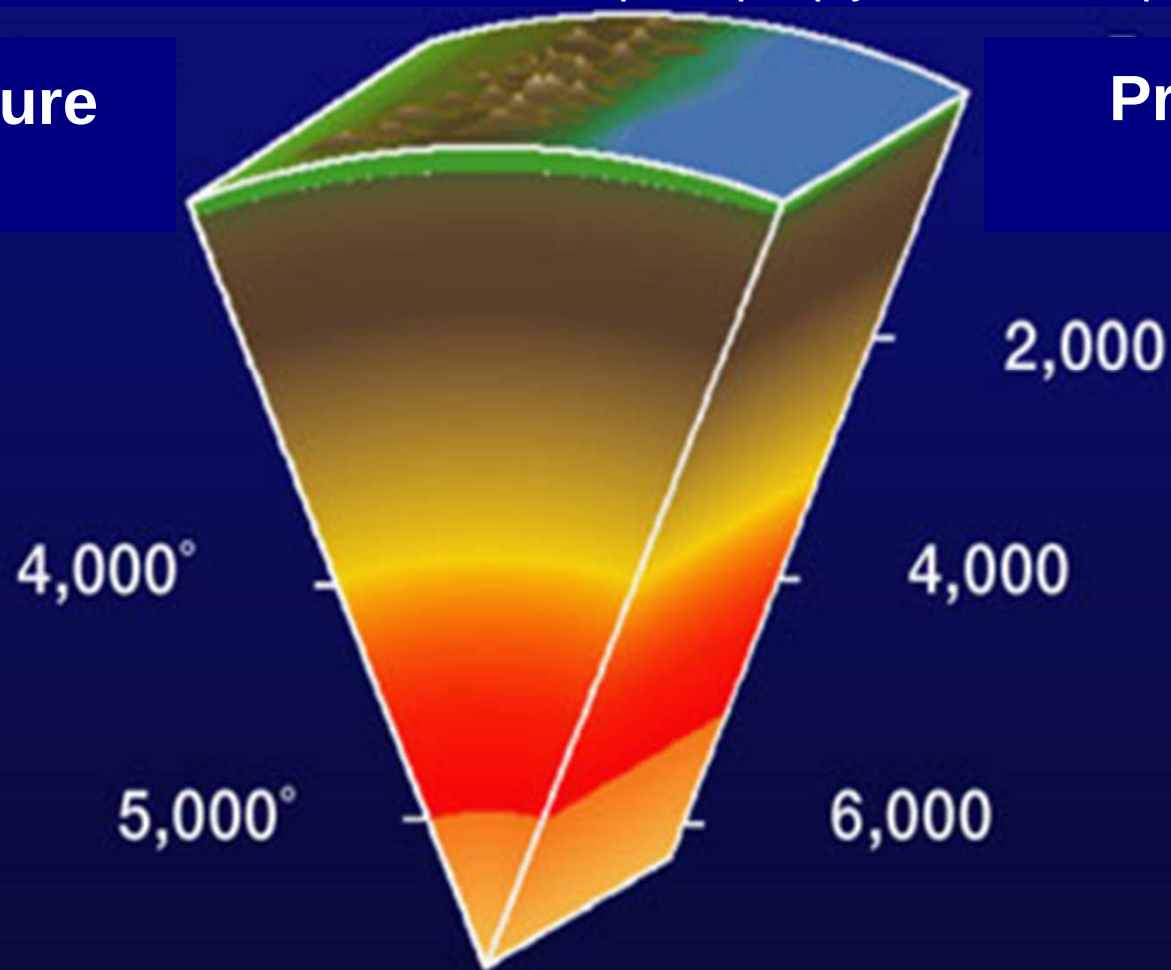
Energie géothermique

Température de la terre

La température augmente au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le sol terrestre, exception faite des quelques dizaines de mètres qui subissent des contraintes extérieures périodiques (rayonnement solaire par exemple)

Température
°C

Profondeur
Km



Energie géothermique

- Les sources chaudes sont utilisées depuis l'Antiquité pour leurs vertus thérapeutiques;
- En 1827, François Larderel, Français émigré en Italie, remplaça le bois de chauffage par la vapeur naturelle;
- Larderel entreprit en 1833 le premier forage géothermique pour obtenir davantage de vapeur à une température supérieure;
- Les travaux de Larderel furent poursuivis par le prince Pierro Conti en Toscane : en 1904, il alluma cinq ampoules électriques au moyen d'une dynamo entraînée par une turbine à vapeur géothermique;
- La production d'électricité nécessite une profondeur de 2-3 Km où la température atteint facilement les 350 °C;
- La production mondiale en électricité est de 9600 MW (2006).

Energie géothermale, historique

- L'énergie géothermique était déjà exploitée par les Romains qui utilisaient l'eau des sources thermales chaudes pour le chauffage, le bain ou à des fins thérapeutiques;
- La première utilisation à l'ère industrielle de l'énergie géothermique est généralement attribué à l'Italie au XIX^e siècle avec l'exploitation de geysers;
- La première production d'électricité s'est faite en Italie en 1903. Cette dernière application est encore fortement développée dans le monde.

Energie géothermale

- La température augmente au fur et à mesure que l'on descend dans l'écorce terrestre;
- Ce phénomène a pour origine le flux d'énergie géothermique;
- La chaleur produite est essentiellement due à la radioactivité naturelle, essentiellement l' ^{235}U , l' ^{238}U , le thorium et le ^{40}K ;
- L' ^{235}U dégage une chaleur d'environ 18J/g/an, son accumulation dans la croûte terrestre suffit à générer de la chaleur, qui peut être stockée dans des réservoirs naturelles (nappes d'eau).

Energie géothermale (suite...)

- Le gradient géothermique est en moyenne de $3,3\text{ °C}/100\text{ m}$ dans les zones dites normales et dépasse les $10\text{ °C}/100\text{ m}$ dans des zones favorisées;
- Le flux de chaleur géothermique est en moyenne de $0,06\text{ W}/\text{m}^2$ soit environ 3500 fois moins que le flux solaire reçu à la surface du sol.

Energie géothermale, classement

- Selon la température de la source géothermale, on peut classer la géothermie en différentes catégories suivant qu'elle peut produire de l'électricité ou pas;
- La géothermie basse énergie correspond à des température entre 30 et 100°C. Les sources se trouvent de quelques centaines de mètres de profondeur jusqu'à 2500 m. L'investissement dans ce cas est de l'ordre de 400-600 € le kW installé, mais le coût de fonctionnement est de 0,05 à 0,1 centime d'euro par kWh thermique;

Energie géothermale, classement (suite...)

- La géothermie moyenne énergie correspond à des sources d'eau chaude dont la température est comprise entre 90°C et 180°C. Elles peuvent se situer entre quelques centaines de mètres et plusieurs kilomètres de profondeur. On peut mettre en œuvre des installations permettant de produire des quantités d'électricité allant de quelques kW à quelques MW, qui correspond à un investissement compris entre 1000 et 4000 €/kW installé et à une durée de vie de 30 à 50 ans;

Energie géothermale, classement (suite...)

- La géothermie haute énergie utilise des gisements de vapeur situés entre 1500 et 3000 m de profondeur, dont la température va de 250° à 350°C. Selon la manière dont on produit l'électricité (à partir de la vapeur sèche ou après séparation de celle-ci), le coût du kWh électrique varie de 4,5 à 7 centimes d'euro.

Energie géothermale, production

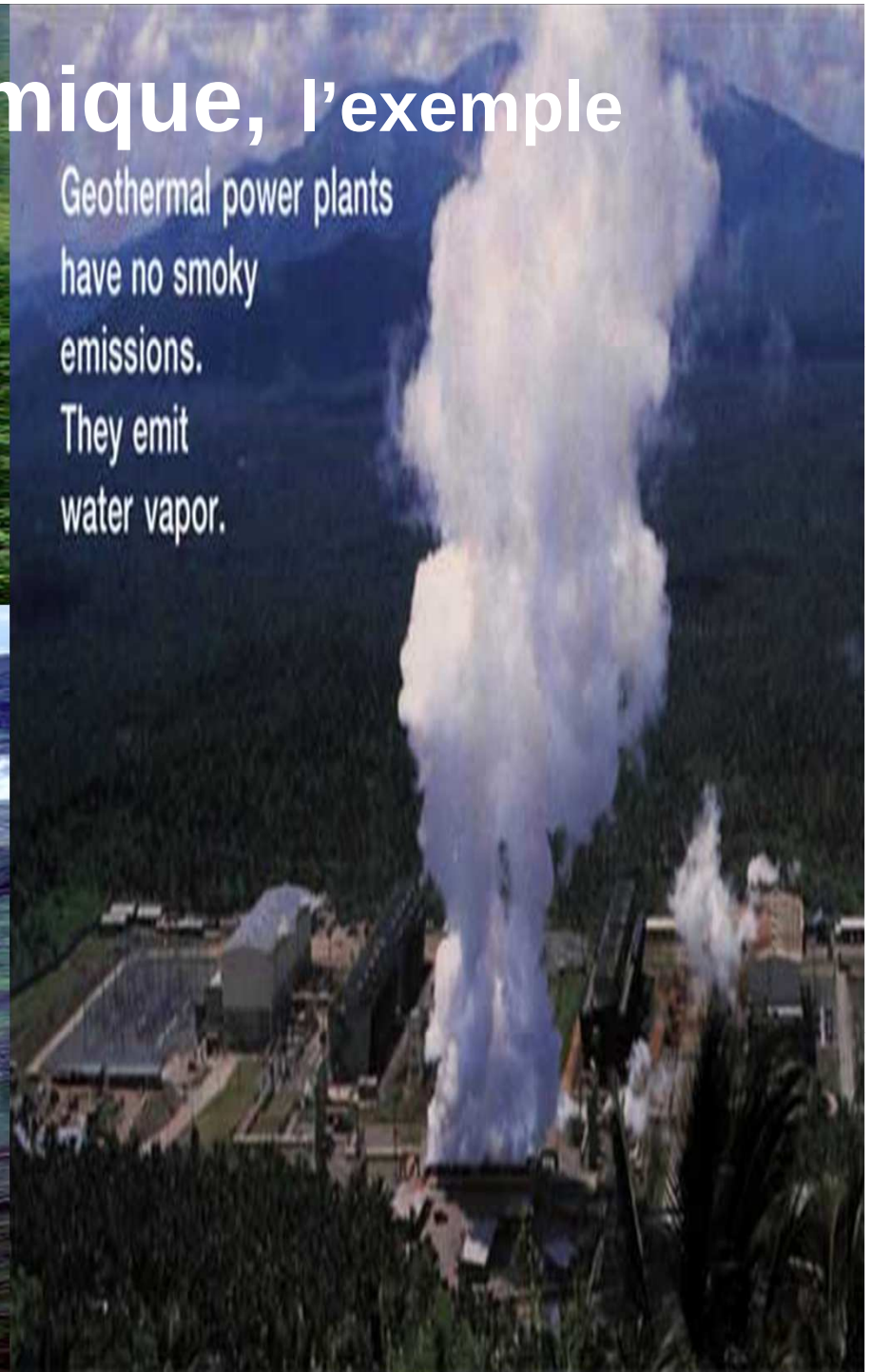
- L'usage électrique de la source géothermique en 2004 est d'environ 3395 MWe aux USA, suivi par le Philippines 2291 MWe, l'Indonésie 1206 MWe, le Mexique 1144 MWe, et l'Italie avec 852 MWe. L'usage thermique est de plus de 2000 MWt en Chine, 1870 MWt aux USA, 1443 MWt en Islande, 1331 MWt en Bulgarie, et 120 MWt en Algérie;
- La capacité en énergie géothermique dépasse 28900 MW à l'échelle mondiale (2007).

Production de l'électricité

Pays	1990 MWe	1995 MWe	2000 MWe	2005 MWe
Argentine	0.67	0.67	0	0
Australie	0	0.17	0.17	0.2
Autriche	0	0	0	1
Chine	19.2	28.78	29.17	28
Costa Rica	0	55	142.5	163
Salvador	95	105	161	151
Ethiopie	0	0	8.52	7
France	4.2	4.2	4.2	15
Allemagne	0	0	0	0.2
Guatemala	0	33.4	33.4	33
Island	44.6	50	170	202
Indonésie	144.75	309.75	589.5	797
Italie	545	631.7	785	790
Japon	214.6	413.71	546.9	535
Kenya	45	45	45	127
Mexique	700	753	755	953
New Zélande	283.2	286	437	435
Nicaragua	35	70	70	77
Nouvelle-Guinée	0	0	0	6
Philippine	891	1227	1909	1931
Portugal	3	5	16	16
Russie	11	11	23	79
Thaïlande	0.3	0.3	0.3	0.3
Turquie	20.6	20.4	20.4	20.4
USA	2774.6	2816.7	2228	254 4
Total	5831.72	6833.38	7974.06	8912

Energie géothermique, l'exemple

Geothermal power plants
have no smoky
emissions.
They emit
water vapor.

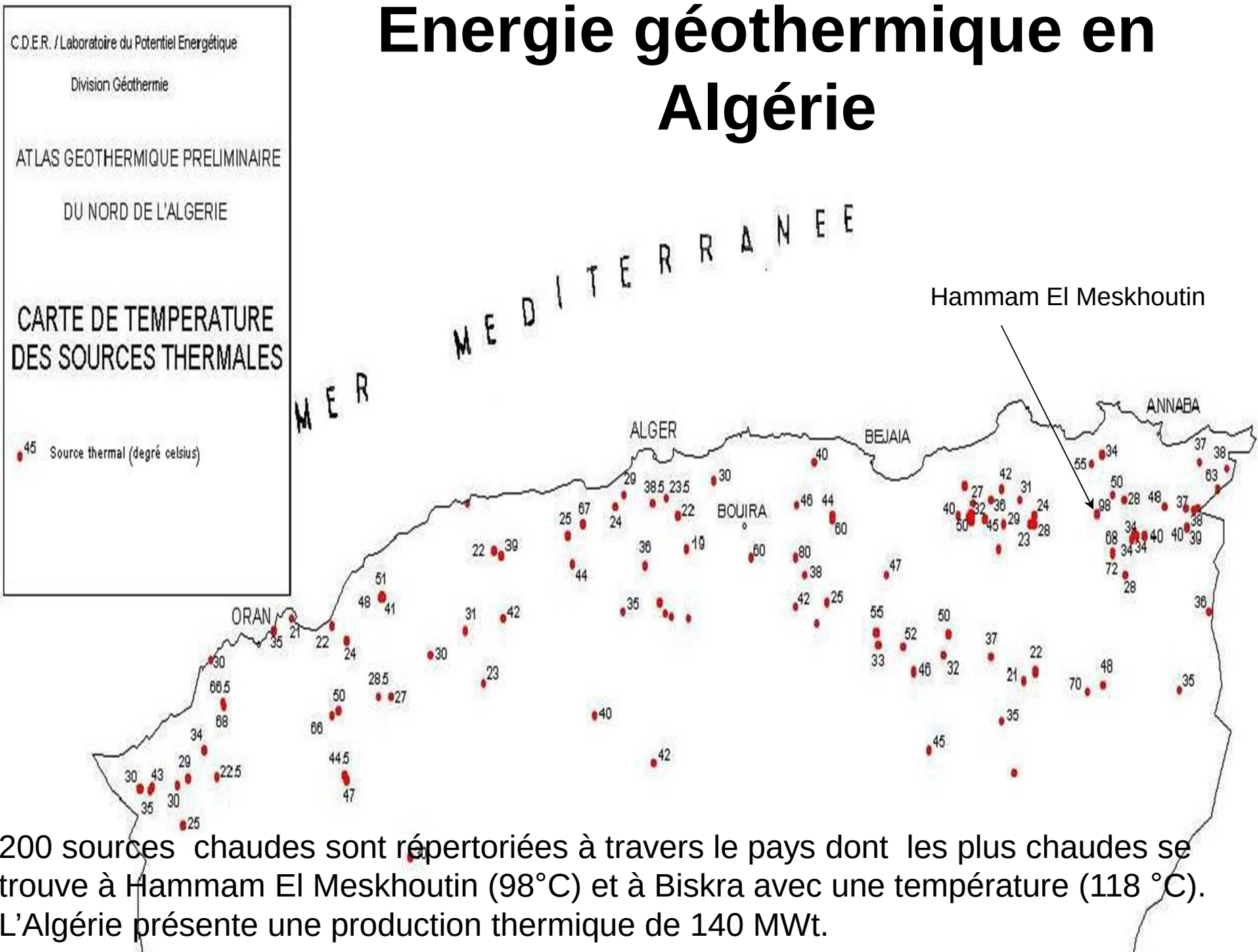


Energie géothermique en Algérie

L'énergie géothermique n'est pas développée en Algérie. Les Algériens exploitent la géothermie par l'utilisation de l'eau des sources thermales chaudes pour le bain ou à des fins thérapeutiques.



Energie géothermique en Algérie



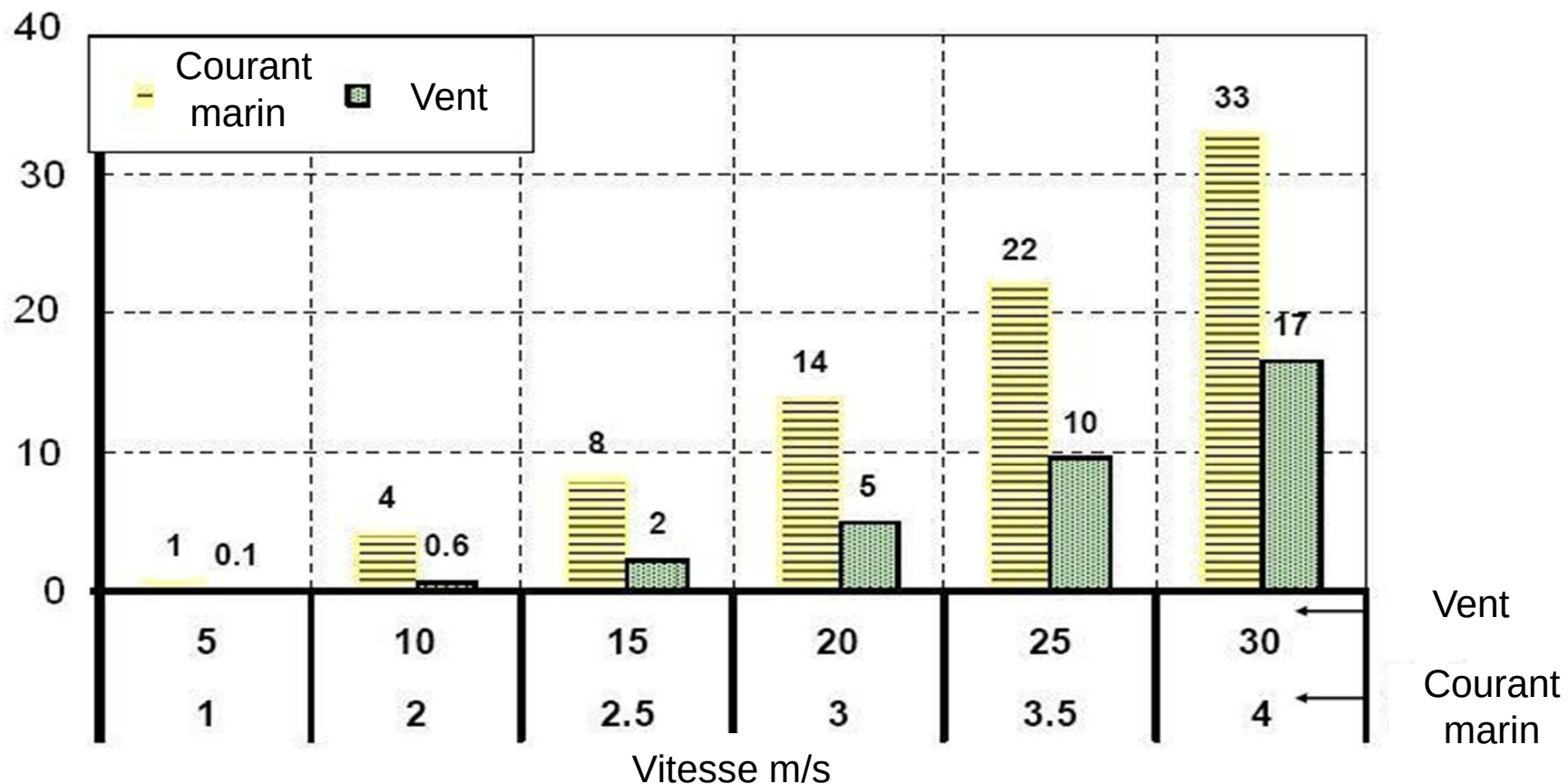
Energie des océans (Marine)

Cette énergie est considérée comme une énergie nouvelle et sa conversion en électricité a été mise à l'étude et plusieurs types de dispositifs mécaniques ont été conçus pour récupérer l'énergie des vagues. Les problèmes d'opération et d'entretien sont toutefois considérables. Quelques dispositifs sont en exploitation régulière.

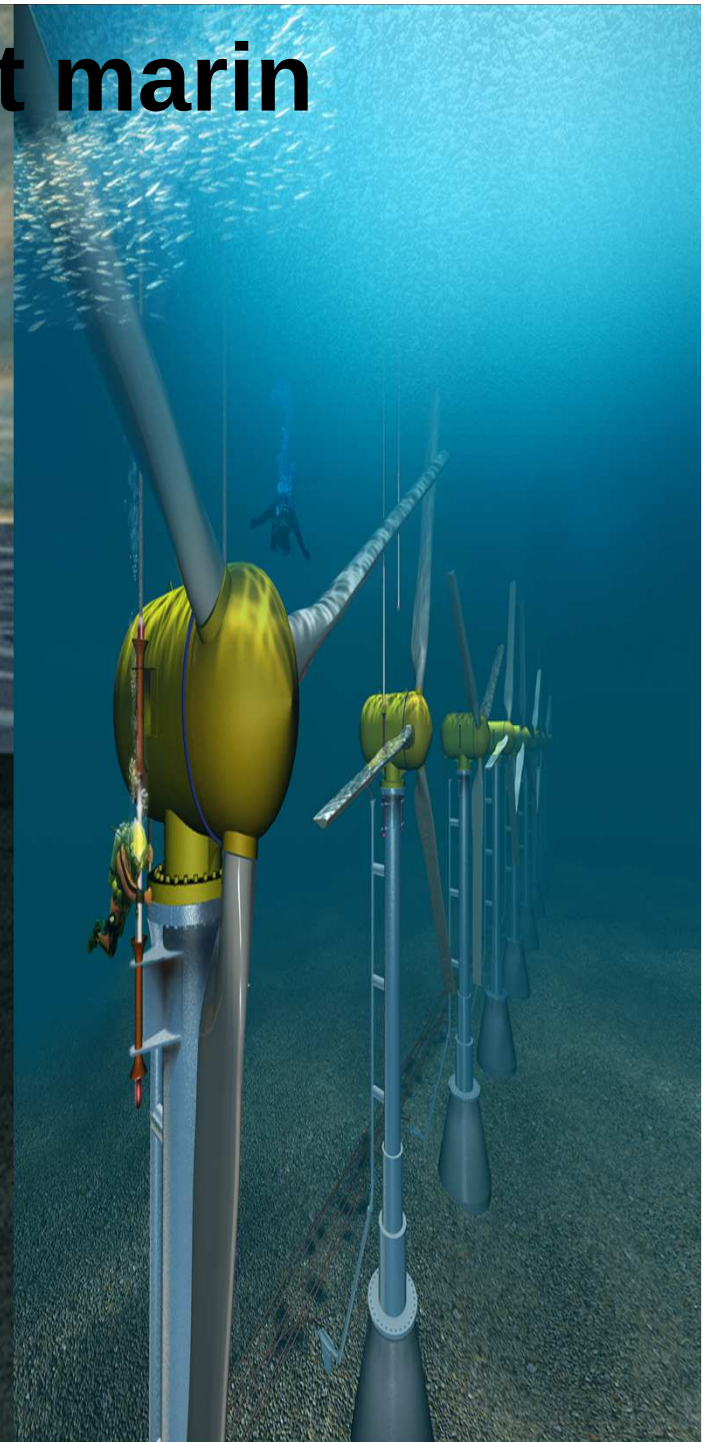
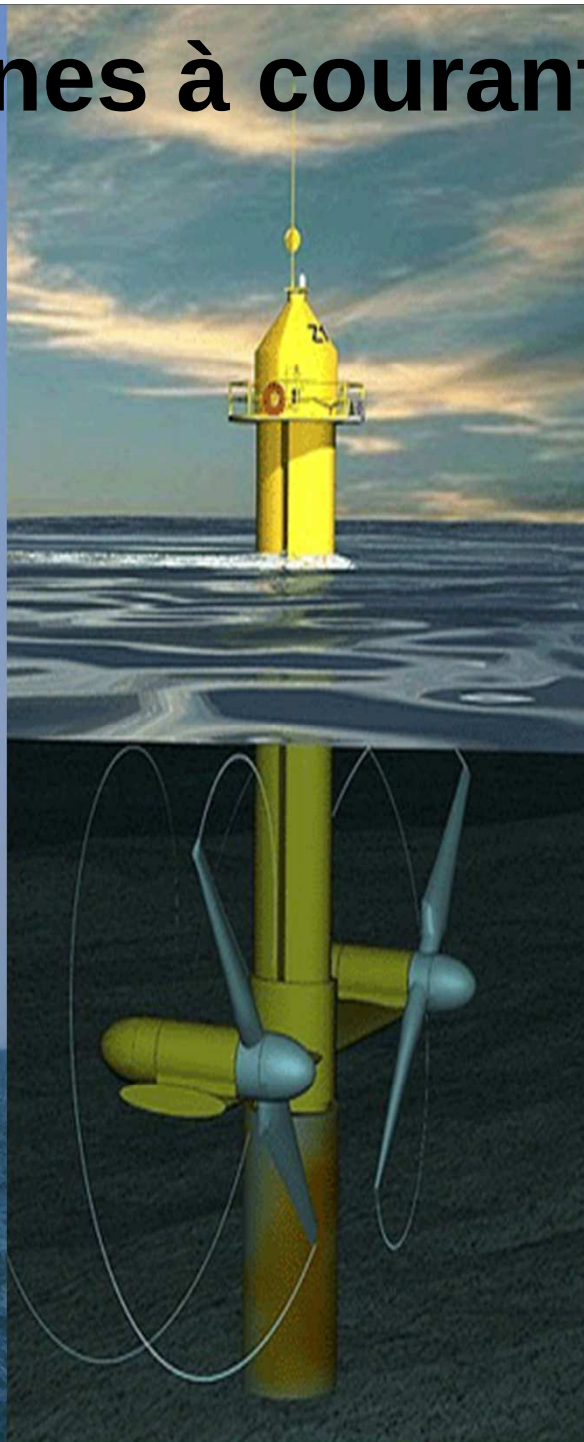


Les turbines à vent et turbines à courant marin

Densité de
puissance
KW/m²



Turbines à courant marin

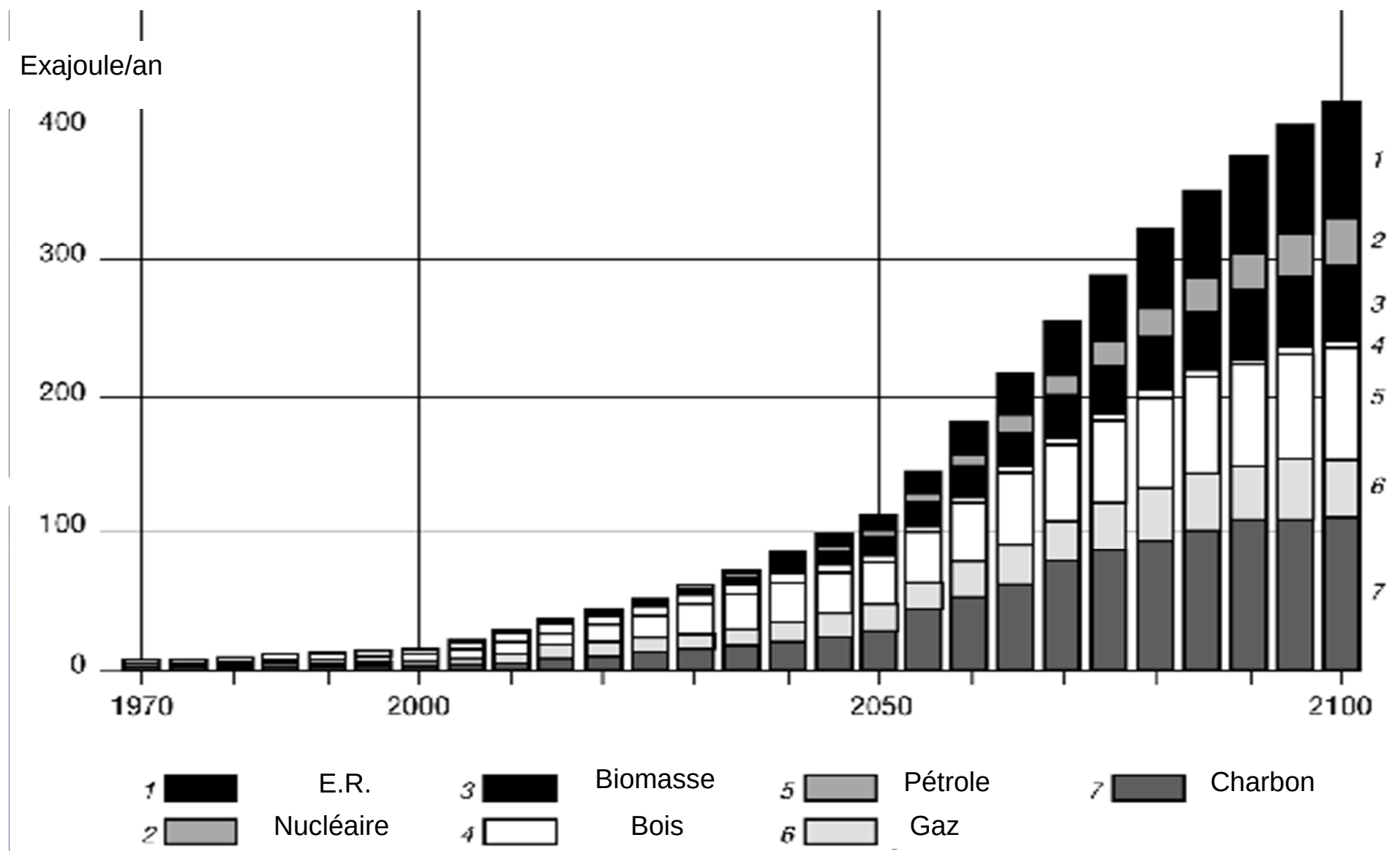


Les turbines à vent et turbines à courant marin

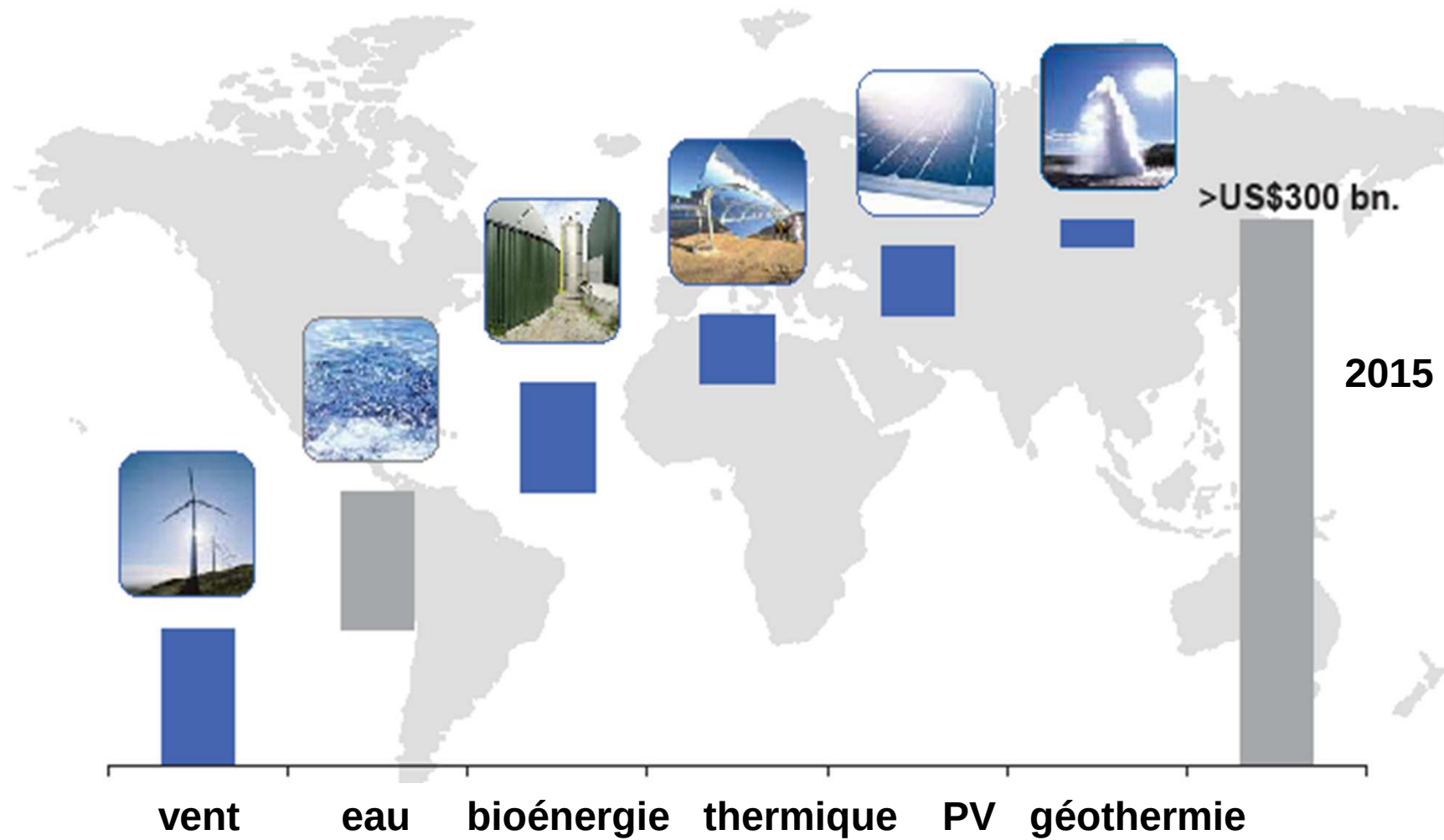
Pour générer 1MW d'électricité il faut que le diamètre de l'hélice de l'aérogénérateur soit de 90m mais seulement 9 m pour le cas de la turbine à courant marin.



Consommation énergétique en Afrique 1970-2100

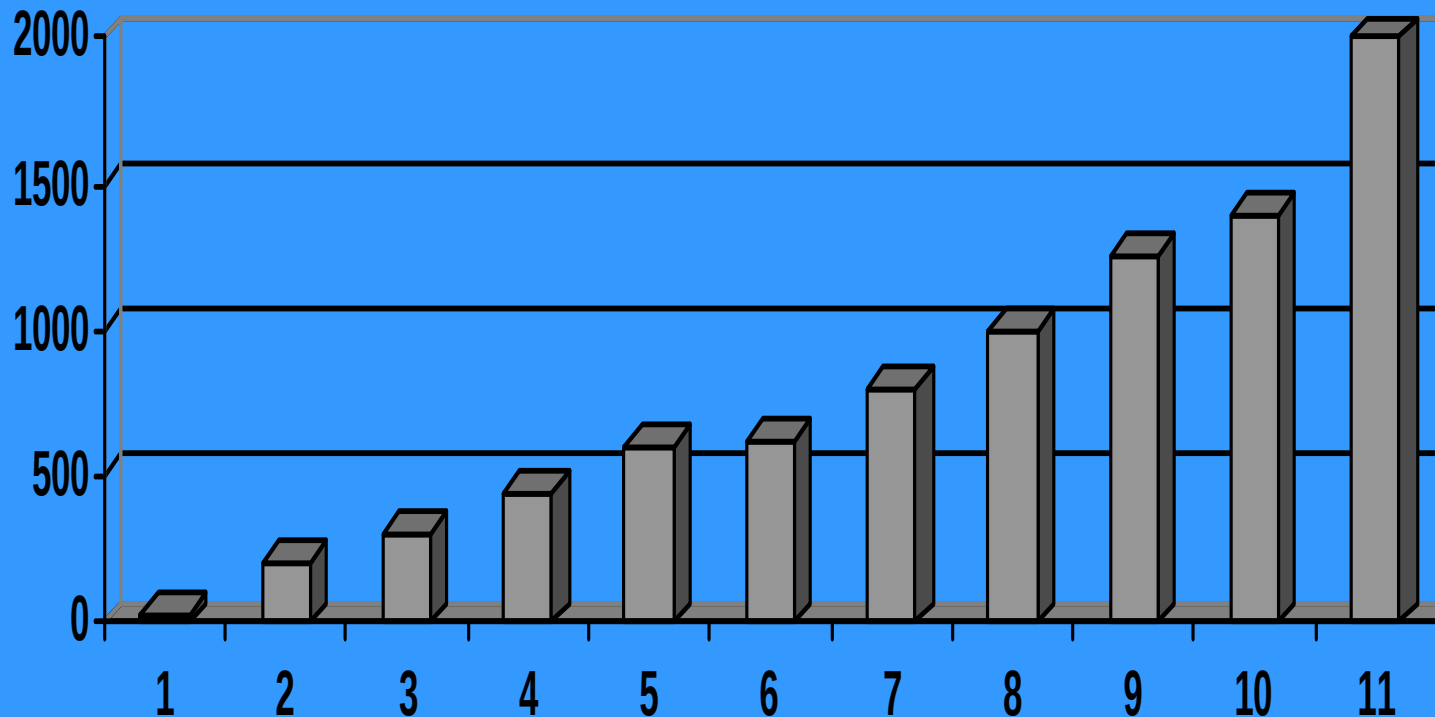


Evolution du marché des énergies renouvelables



Scénario sur les ERs, par Shell (2060)

Exajoule



1-Biomasse traditionnelle, 2-Charbon, 3-Pétrol, 4-Gaz, 5-Hydroelectrique, 6-Nucleaire, 7-Eolien, 8-Nouvelle biomasse, 9-Solaire, 10-Geothermique/ocean, 11-Surprise

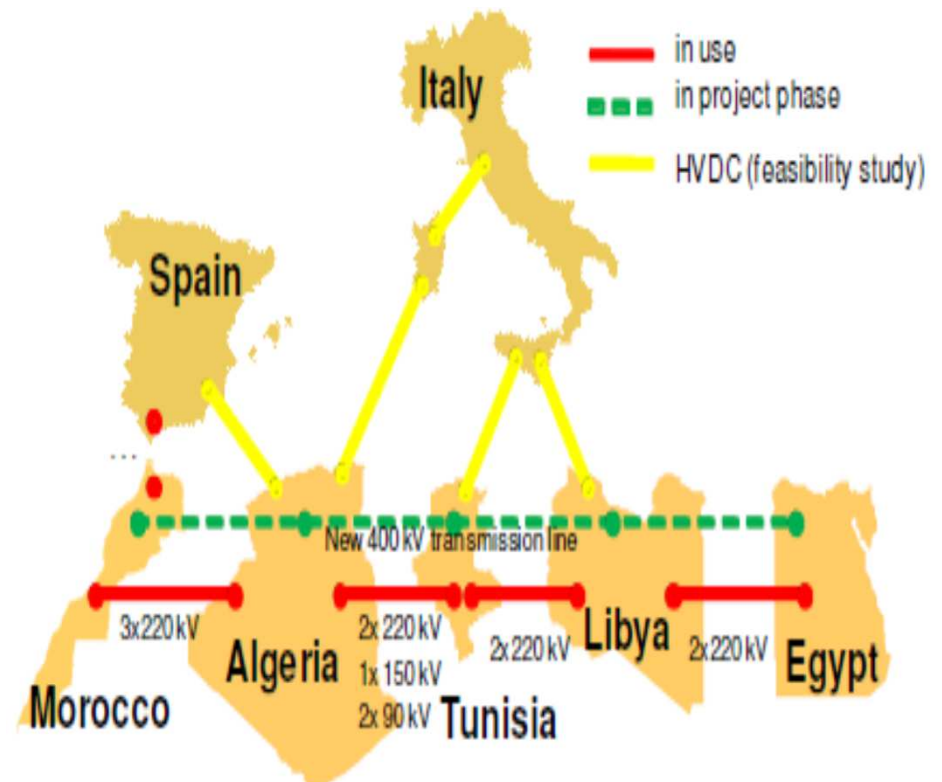
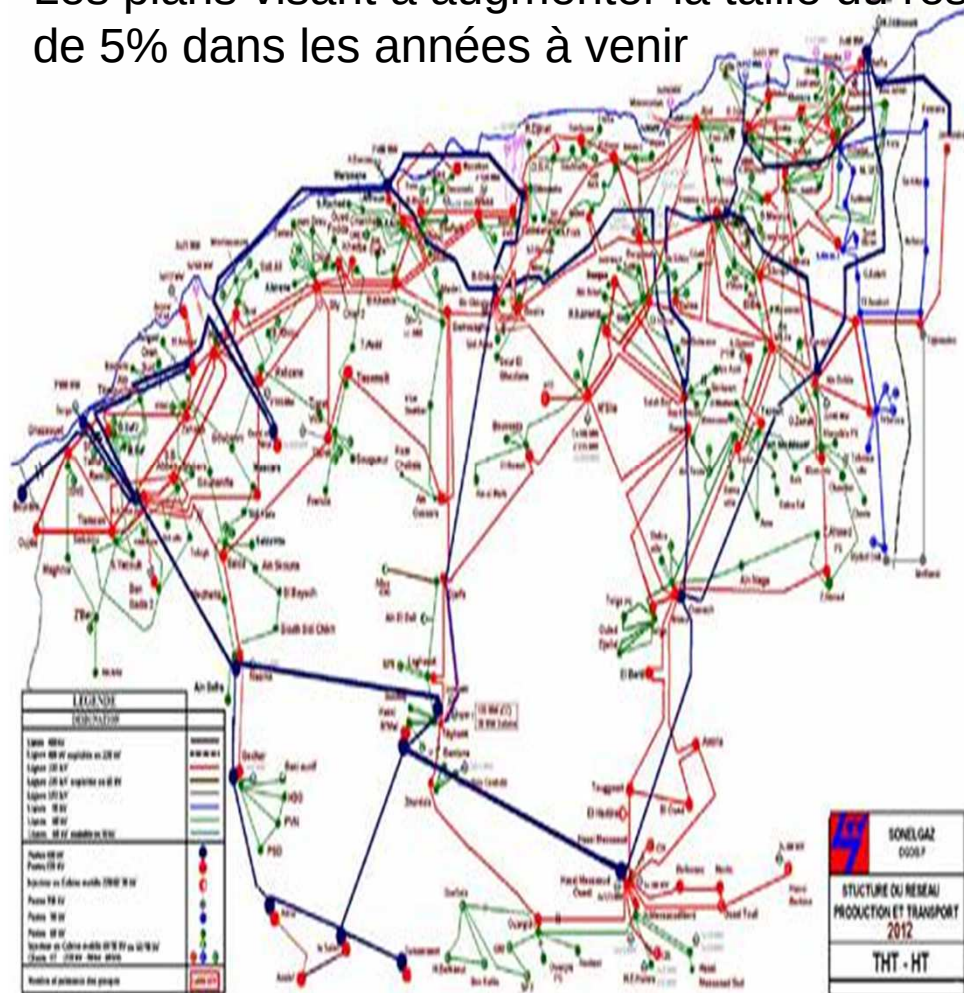
Réseau électrique algérien. Sonelgaz

2012

Le marché de l'électricité en Algérie est très important avec un taux de croissance supérieur à 6%

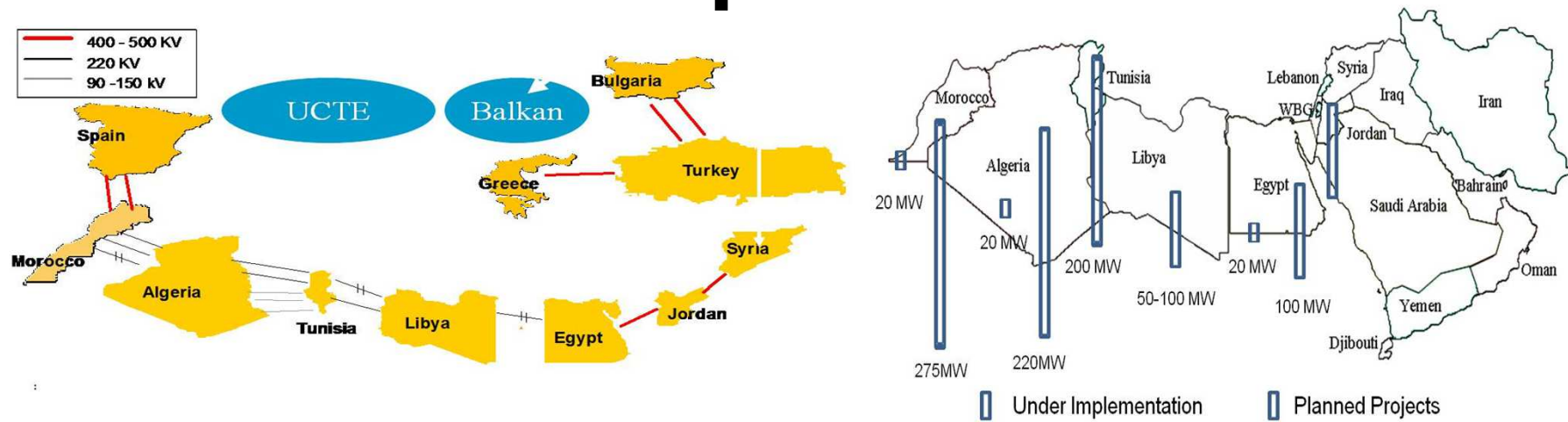
225309 km de lignes électriques

Les plans visant à augmenter la taille du réseau de 5% dans les années à venir



Les lignes de transmission possibles en Afrique du Nord et en Europe

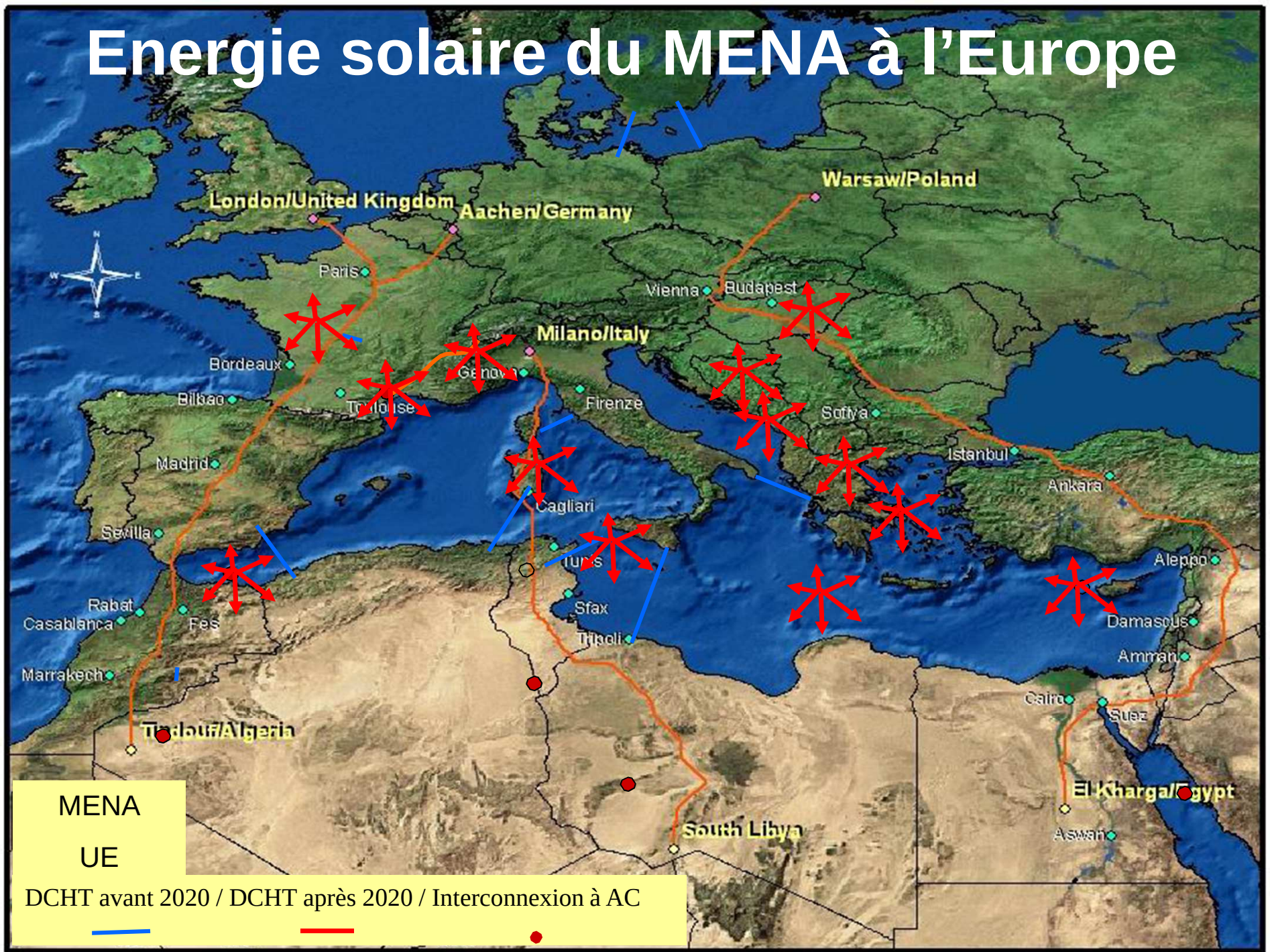
Perspectives



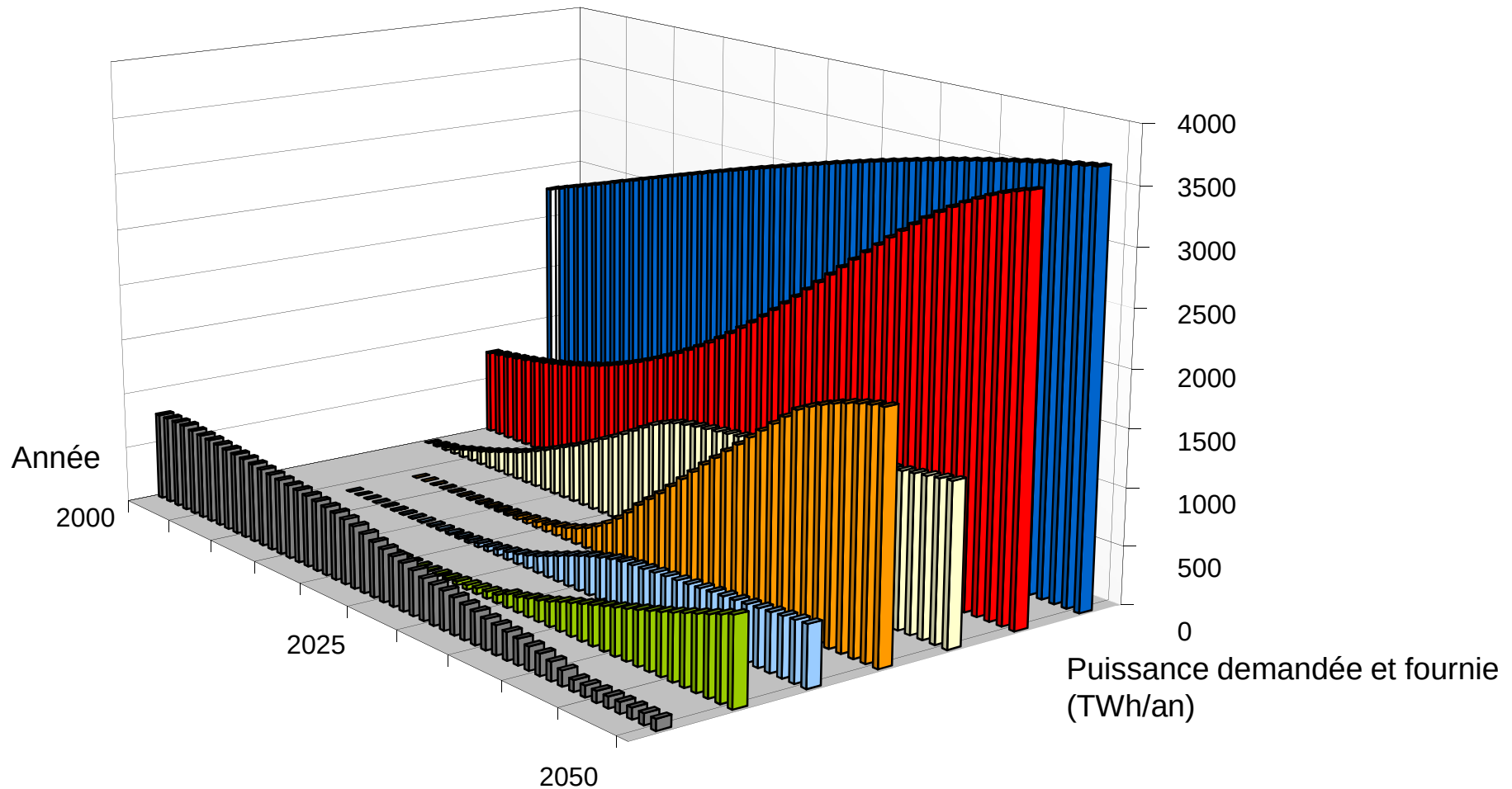
- vent
- ▤ géothermie
- ◆ eau
- ▲ biomasse
- solaire
- conventionnelle



Energie solaire du MENA à l'Europe



Interconnexion MENA et UE



■ Anciennes installations MENA ■ Exportation vers l'Europe

■ Nouvelles installations MENA ■ Demande totale MENA

■ Dessalement

■ Demande totale Europe

■ Puissance solaire MENA

Tendances de la recherche sur l'énergie durable en Algérie

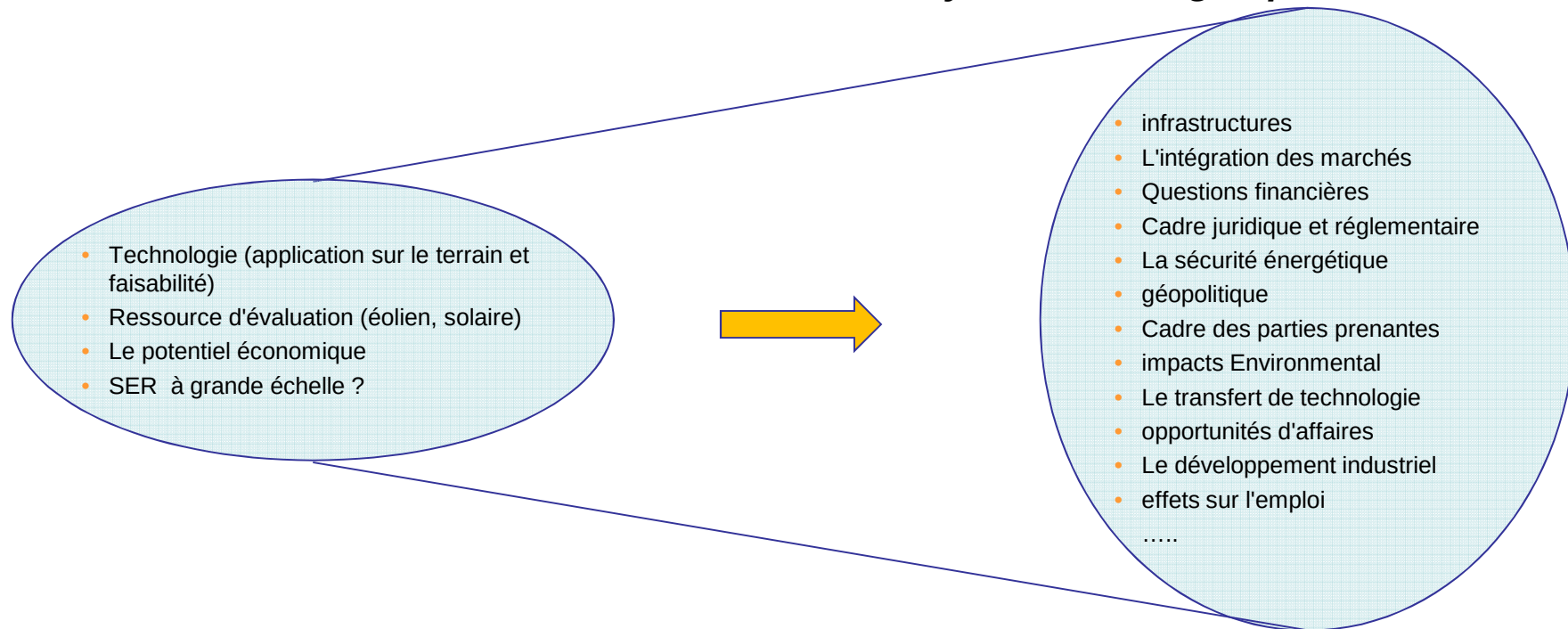
Dans le passé:

«Comprendre les technologies renouvelables et leur rôle potentiel »



Aujourd'hui:

«Comprendre le cadre, les processus et les impacts de déploiement à grande échelle renouvelables dans les systèmes énergétiques»

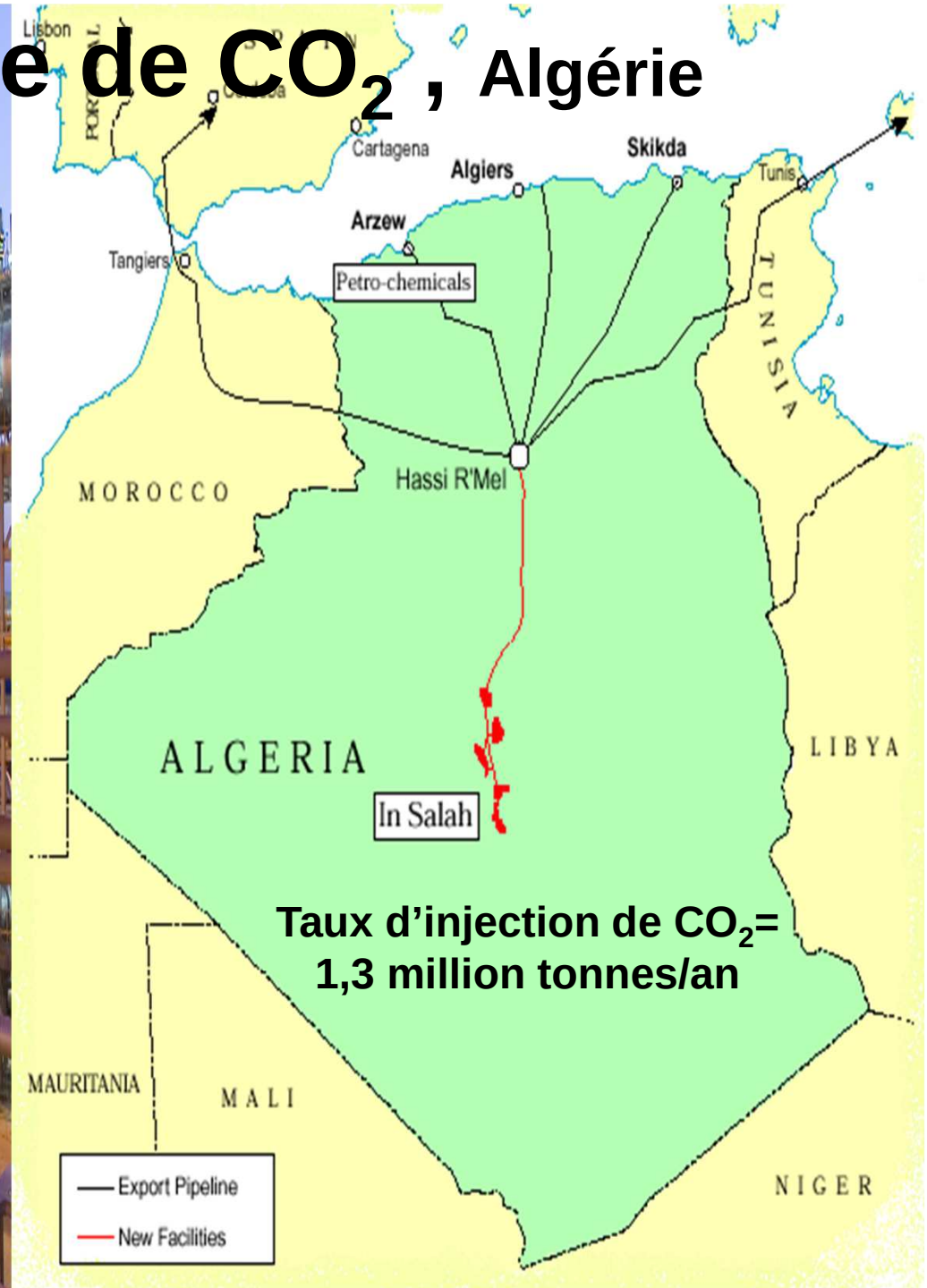


Ingénierie, économie



Multitude de nouvelles disciplines: sciences politiques, finances, gestion, sociologie, droit, sciences de l'environnement, ...

MDP, Capture de CO₂, Algérie

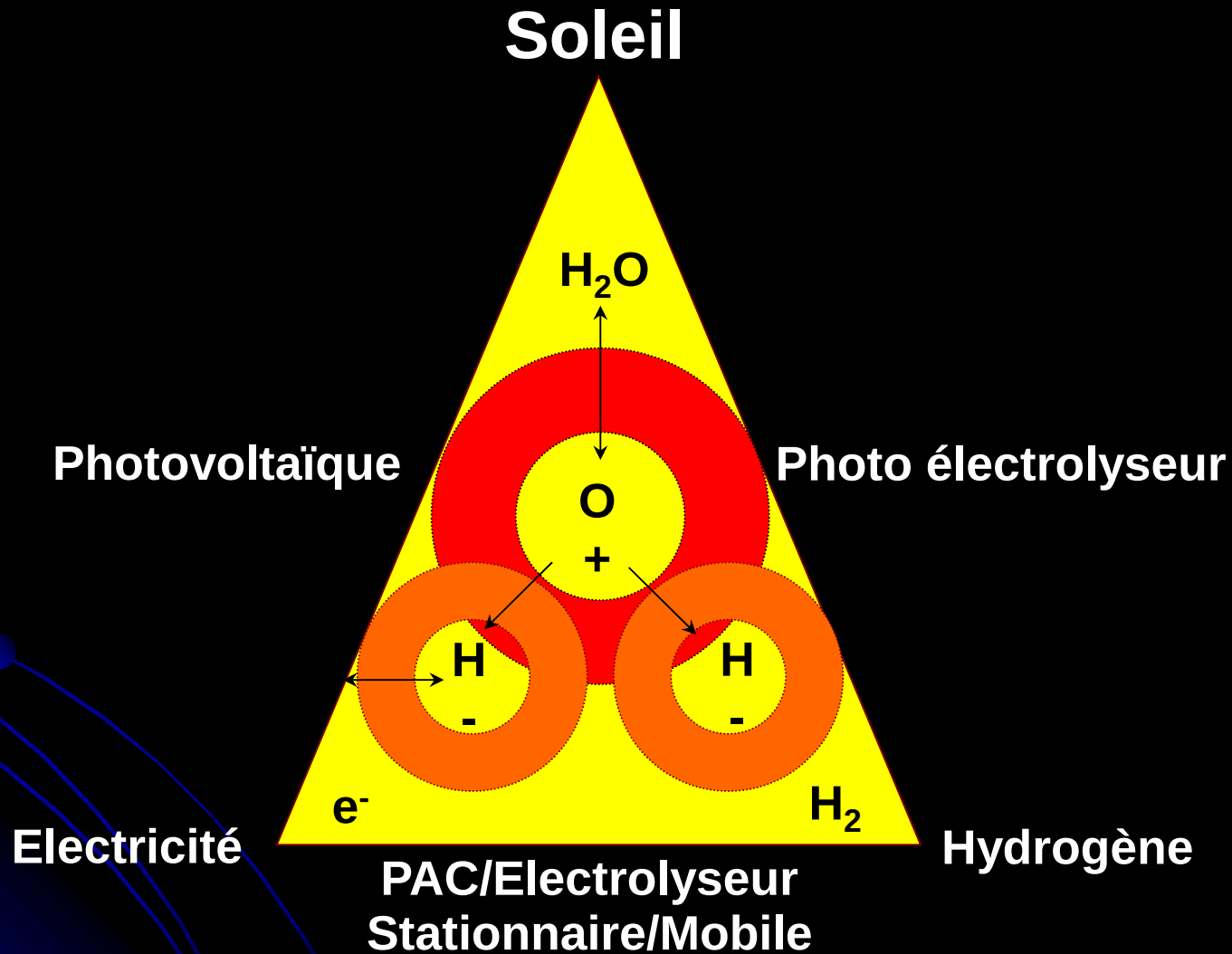


Economie d'hydrogène

Vecteur énergétique du futur

« Je pense qu'un jour, l'hydrogène et l'oxygène seront les sources inépuisables fournissant chaleur et lumière » ! "L'île mystérieuse", Jules Verne, 1874

Hydrogène, le combustible du future



L'hydrogène

- Les qualités de l'hydrogène sont nombreuses :
 - c'est l'atome le plus abondant sur terre, comme constituant de l'eau,
 - c'est la molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel,
 - il n'est ni polluant, ni toxique,
 - sa combustion ne produit aucun polluant (seulement de l'eau)
 - c'est le plus léger des gaz, ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air)
 - ses modes de production sont nombreux, adaptés à toutes les formes primaires d'énergie (électrolyse, décomposition thermique de l'eau, reformage)
 - son transport est aisé et préserve l'environnement (en particulier par pipes)
 - ses modes de transformation sont variés (pile à combustible, moteur, turbine, combustion)

Le marché actuel de l'hydrogène

- L'hydrogène est actuellement une des matières de base des industries chimiques et pétrochimiques. Plus de la moitié de l'hydrogène consommé est utilisée pour la production d'ammoniac (50%) et de méthanol (8%). Le reste est essentiellement utilisé par la pétrochimie. Une petite partie sert néanmoins dans d'autres secteurs comme la soudure, l'industrie du verre, la fabrication de semi-conducteurs et la fabrication d'aliments.
- L'hydrogène est encore aujourd'hui un produit chimique et non pas déjà un vecteur d'énergie, si ce n'est la propulsion spatiale qui ne représente qu'une infime partie.

Consommations annuelles d'hydrogène

La valeur de consommation actuelle dans le Monde est de 45 millions de tonne par année.

Ramenés en équivalents énergétiques, ces chiffres ne représentent que 1,5% de la production totale d'énergie primaire. De plus, la plus grande partie de cet hydrogène est en fait un sous-produit d'autres procédés mis en œuvre dans les sites industriels concernés et la production d'hydrogène à partir d'unités spécifiques ne correspond qu'à moins de 0,1% de la consommation mondiale d'énergie.

Sources de production de l'hydrogène

- Soit l'eau, ressource essentielle d'atomes d'hydrogène. La molécule d'eau devra alors être craquée. Deux méthodes le permettent : l'électrolyse et la dissociation thermique.
- Soit la biomasse, comme le méthanol, l'éthanol ou le méthane qu'il faudra reformer pour en extraire l'hydrogène.
- Soit la production directe d'hydrogène par bio-photo synthèse.

Aujourd'hui, l'hydrogène le plus économique provient du reformage de gaz naturel. Demain et du fait de la raréfaction progressive de cette source relativement bon marché, le coût de cet hydrogène risque d'être, à euros constants, sensiblement plus élevé.

Production de l'hydrogène

Si on élimine les sources fossiles qui vont progressivement disparaître, il reste deux grandes sources d'énergie primaire : l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables.

De l'avis général, la transformation de l'électricité **nucléaire** en hydrogène par électrolyse de l'eau ne présente qu'un intérêt limité sauf à vouloir profiter de réacteurs électrogènes en sous-charge pendant des périodes creuses. La solution qui apparaît actuellement la plus séduisante est le craquage de l'eau par un procédé thermochimique. La chaleur nécessaire (vers 800°C) étant fournie par des réacteurs nucléaires dédiés, à haute température.

Production de l'hydrogène (suite...)

- **La biomasse** (terrestre ou marine) peut produire de l'hydrogène de deux façons :
 - soit la transformation en alcool (éthanol, méthanol) ou méthane, qui est ensuite reformé;
 - soit la production directe d'hydrogène via des bactéries (comme les hydrogénasses).
- **L'hydraulique**, très développée dans certains pays comme le Canada, fournit l'énergie renouvelable la plus économique. Le Canada avait étudié en détail la possibilité d'exporter vers l'Europe de l'hydrogène produit à partir d'énergie hydraulique au travers du programme européen EQHHPP* (1990 – 1995) mais n'a pas donné suite.

*EQHHPP : Euro Quebec Hydro Hydrogen Power Project

Production de l'hydrogène (suite...)

- **L'éolien** est une source qui est aussi en plein développement dans de nombreux pays, dont la France via le programme national Eole 2005. L'électricité produite peut être partiellement ou totalement transformée en hydrogène par électrolyse avec un rendement de 65-70% pour les grosses unités dont le coût est de l'ordre de 1000 €/kW.

Production de l'hydrogène (suite...)

- **Le solaire** se présente sous deux formes : le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Le solaire thermique ne peut être utilisé que sur place compte tenu de son bas niveau de température (60-80°C). Le solaire thermique à plus haute température (à concentration, dans la gamme 200-250°C) n'est réaliste que dans les pays à fort ensoleillement direct et peut alors produire de l'électricité via une machine thermique, laquelle électricité produira de l'hydrogène par électrolyse. Son coût actuel est très élevé (de l'ordre de 1€/kWh) et les perspectives de décroissance de ce coût sont encore mauvaises à moyen terme.
- La source sur laquelle les plus grands espoirs sont fondés est le photovoltaïque. Il produit de l'électricité qui peut fournir de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. La production des cellules est aujourd'hui en forte croissance et son prix est en baisse régulière mais encore trop élevé, d'un facteur 3 environ. Des sauts technologiques en cours d'étude (comme les cellules à couche mince) devraient permettre d'atteindre les coûts objectifs dans quelques années.

Transport de l'hydrogène

- Le mode de transport qui sera probablement retenu à terme est le transport sous pression par pipes plutôt que le transport cryogénique, trop gourmand en énergie donc nécessairement d'un coût plus élevé. Le transport par pipes profite d'une très longue expérience :
 - en Allemagne, 230 Km de pipes sous 22 bars sont exploités par Huels A.G. depuis 1938,.
 - en France, Air Liquide exploite près de 1000 Km de pipes,
 - aux Etats-Unis, environ 700 Km sont exploités
- Aucun incident ne s'est produit et on peut considérer que la fiabilité de ce mode de transport est excellente.

Stockage de l'hydrogène

- Il faut distinguer le stockage de masse et le stockage en petites unités pour des véhicules et des générateurs portables. Dans le premier cas, deux solutions sont envisageables :
 - soit le stockage dans de grandes cavités naturelles ou artificielles (anciennes mines, par exemple) : diverses expériences en ont montré la faisabilité.
 - soit la transformation de cet hydrogène en un composé hydrogéné (alcool, par exemple) dont le stockage fait appel à des technologies déjà maîtrisées et dont la conversion ultérieure en hydrogène est facile (reforming) et relativement économique (les rendements des reformeurs sont élevés).
- Dans le cas de petites unités (quelques dizaines de grammes d'hydrogène à quelques kg), plusieurs solutions sont en cours de validation ou de développement. Dans les premières, on trouve :

Stockage de l'hydrogène (suite...)

- le stockage sous pression dans la gamme des 350 bars: les performances sont élevées puisque, récemment, le record de 11.3% de densité massique a été atteint grâce à une technologie composite (vessie en alliage d'aluminium renforcée par une structure composite en fibres de carbone).
- le stockage dans des hydrures métalliques : cette technique est déjà ancienne, très sûre et très bien maîtrisée ; en contrepartie, ce mode de stockage souffre de deux défauts, la densité massique des hydrures est élevée et leur capacité de stockage est faible, surtout si on souhaite conserver une température de déstockage raisonnable (inférieure à 200°C). C'est ainsi que les densités spécifiques ne dépassent pas 2-3%, ce qui ne peut convenir que pour de faibles masses d'hydrogène à stocker.
- le stockage sous forme cryogénique (-253°C) de quelques kilogrammes d'hydrogène, utilisé en particulier par le constructeur automobile BMW pour ses prototypes à hydrogène, et quelques autres constructeurs pour alimenter des prototypes de véhicules à pile à combustible.

Pile a combustible

Une pile à combustible est un générateur d'électricité qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique par une réaction d'oxydoréduction. La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau.

Découverte par W. Grove, en 1839, le principe de fonctionnement est extrêmement simple : il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue :



Cette réaction, dans une large gamme de températures de 70°C à 1000°C, s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes séparées par un électrolyte ; c'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Historique de la pile a combustible



**William Robert Grove
(1839)**



**Pile de Bagdad
(200 ans avant JC.)**



**Allesandro Volta
(1800)**



**Christian Friedrich
Schoenbein (1838)**

Historique (suite...)

- En **1839**, un juge anglais, Sir William GROVE, chercheur amateur en électrochimie, découvre le principe de la pile à combustible. Dans son expérience, il utilisait un tube en U avec deux électrodes en platine. Grâce à un courant électrique, il parvint à obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène : c'est ce que l'on appelle l'électrolyse. Mais en coupant ce courant, il constata que ces gaz donnaient lieu à un courant électrique de sens inverse au premier;
- Durant les années **1930**, un autre scientifique anglais, F. T. BACON entreprend de développer un dispositif opérationnel à partir de l'expérience de GROVE. Ses travaux aboutissent vingt ans plus tard à la réalisation d'une pile d'une puissance d'un kW;
- La consécration surviendra en **1965** quand on apprend que les astronautes des capsules GEMINI consomment l'eau produite par les générateurs électriques de leur vaisseau.

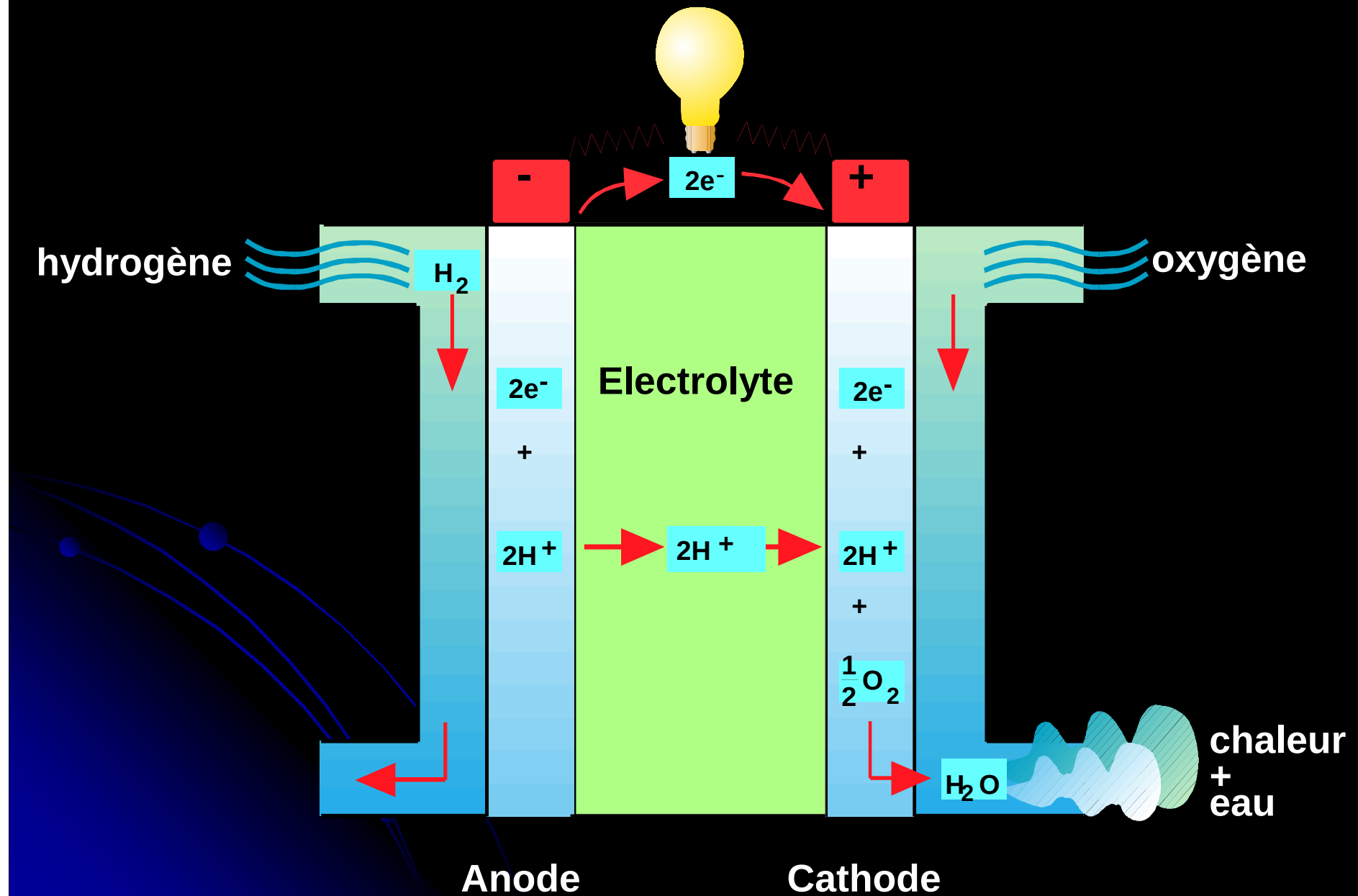
Principe de fonctionnement

Dans son fonctionnement, la pile à combustible est simple, elle est constituée de 3 éléments : l'électrode positive (cathode), l'électrode négative (anode) et l'électrolyte.

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (l'hydrogène, méthanol...). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène). A l'anode, l'atome d'hydrogène réagit et libère 2 électrons (oxydation) qui circulent dans le circuit électrique reliant l'anode à la cathode. A la cathode, on assiste à la réduction cathodique de l'oxygène. Ainsi, on obtient la réaction globale universellement connue : $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

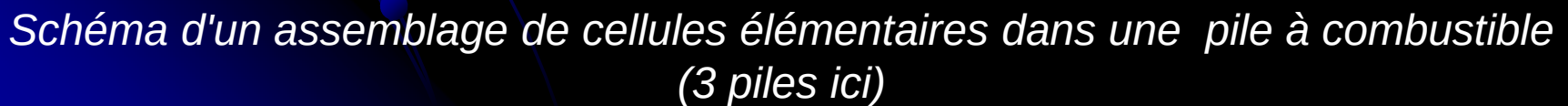
L'électrolyte assure la diffusion d'un ion intermédiaire de la réaction (H^+ ou OH^- selon l'électrolyte). Elle empêche également le passage des électrons ainsi que le mélange de l'hydrogène contenu à l'anode avec l'oxygène contenu à la cathode.

Principe de fonctionnement (suite...)

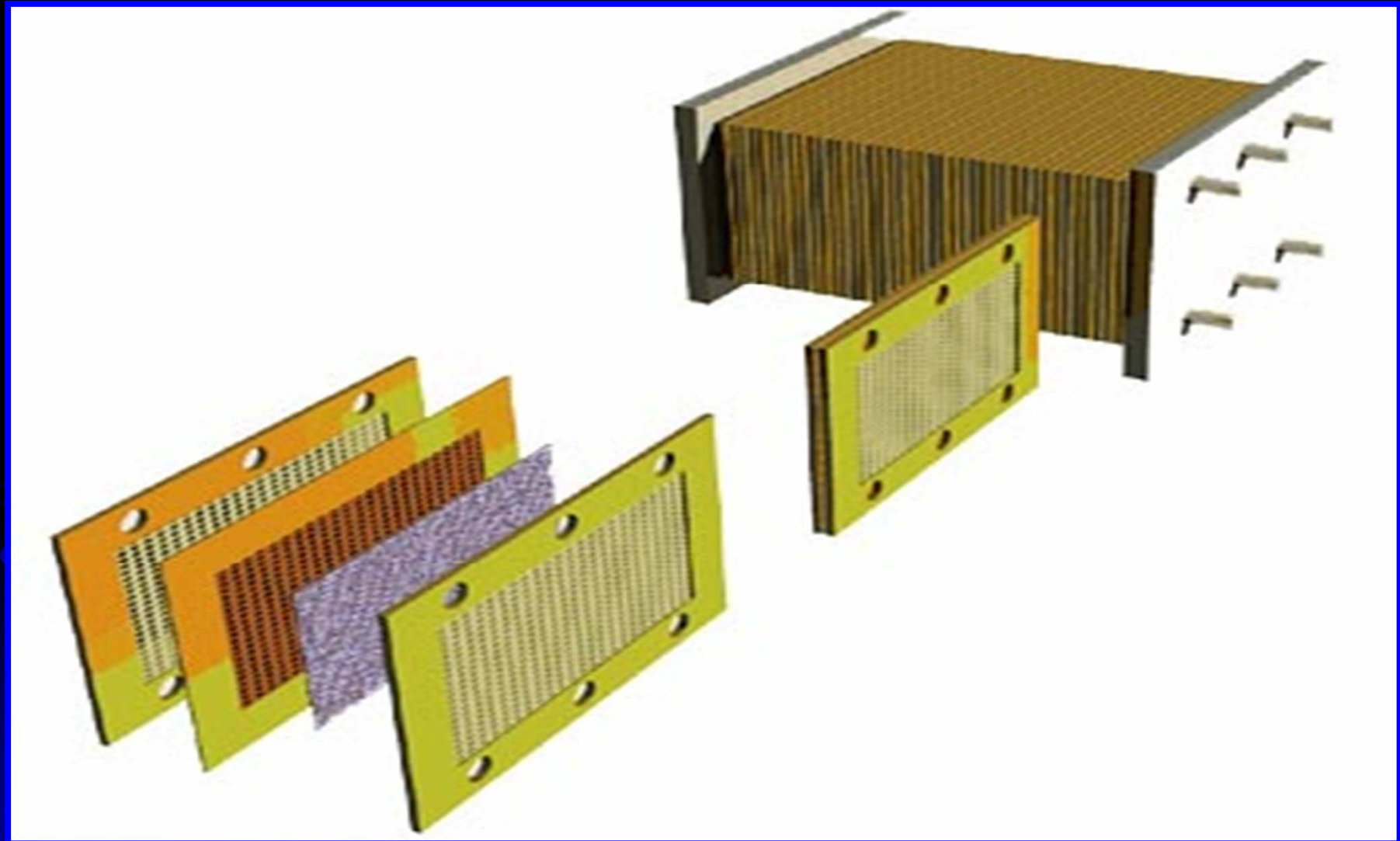


Assemblage des piles à combustible

Dans la pratique un élément de pile à combustible tel qu'il a été décrit ci-dessus produit une tension assez faible (entre 0,6 et 1 V). Un grand nombre de piles élémentaires doivent donc être associées pour obtenir une puissance satisfaisante. Les raccordements électriques (au niveau des plaques bipolaires) s'effectuent en série ou en parallèle pour l'ajustement de la tension et de l'intensité en fonction des besoins. On désigne souvent par "**stack**" l'ensemble des piles élémentaires qui constituent une pile à combustible.



Le stack (suite...)



Une cellule élémentaire d'une pile à combustible

Caractéristiques de la pile

- Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages :
 - de hauts rendements énergétiques même à charge partielle,
 - de faibles émissions sonores
 - peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé)
 - elles sont de construction modulaire
 - diverses températures de fonctionnement
 - pas de parties rotatives

Applications de la pile

- Les domaines d'application des piles à combustibles sont généralement classés en 3 grandes familles :
 - les applications transport où l'on distingue deux applications dans le domaine des transports :
 - la propulsion du véhicule (20 à 50 kW)
 - l'APU (Auxiliary Power unit) : alimentation en électricité des appareils de bord : climatisation, appareils électroniques... (5 kW)
 - les applications stationnaires où l'on distingue :
 - la production individuelle ou domestique (2 à 7 kW)
 - la production collective (200 kW à quelques MW)
 - les applications portables incluant l'ensemble des appareils électroniques portables :
 - ordinateurs, téléphones, assistant de poche...
 - Ces appareils consomment une puissance moyenne allant de 50 mW à 10 W et connaissent une très forte croissance. Cependant, ils sont de plus en plus handicapés par l'autonomie de leurs batteries, même la plus performante comme la batteries ion-lithium.

Les types de piles à combustible

- La **PEMFC** (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) utilise un électrolyte solide acide, le NafionTM ou d'autres polymères d'acide sulfonique, comme le PBI (polybenzimidazole). Quand la membrane est hydratée, ces agglomérats attirent l'eau et les protons H⁺ deviennent mobiles. De cette manière, le NafionTM devient un conducteur de protons quand il est convenablement hydraté. Pour garder leur hydratation à pression ambiante, les PEMFC fonctionnent à moins de 100°C pour éviter l'évaporation de l'eau et donc une chute dans la conductivité ionique de la membrane. Cette basse température permet un démarrage rapide, mais elle entraîne l'empoisonnement du catalyseur par le monoxyde de carbone, des problèmes d'humidité et demande une grande quantité de catalyseur en platine. Des travaux pour créer une membrane à haute température (150°C) sont en cours.

Les types de piles à combustible (suite...)

- La **SOFC** (*Solid Oxide Fuel Cell*) utilise un électrolyte cristallin en zircone dopé d'yttria (ou d'autres céramiques oxydées avec une structure perovskite) pour effectuer le transfert d'ions d'oxygène O^{2-} à travers la structure. Les températures sont très élevées car la conductivité ionique cristalline diminue rapidement à des températures de moins de $800^{\circ}C$. Ces piles présentent plusieurs avantages notamment l'absence de catalyseur, grâce aux températures élevées. De plus, plusieurs types de carburant peuvent être utilisés et le système n'est pas sensible aux polluants typiques (CO, S). L'inconvénient est évidemment la température, qui conditionne le choix des matériaux nécessité et la compatibilité de leurs coefficients de dilatation thermique.

Les types de piles à combustible (suite...)

- L'**AFC** (*Alkaline Fuel Cell*) utilise une solution basique comme électrolyte, (habituellement KOH concentré) et l'ion échangé est OH^- . Elle fonctionne à des températures comprises entre 50°C et 200°C , mais l'électrolyte est empoisonné par le CO_2 présent naturellement dans l'air, ce qui nécessite un purificateur. De plus, l'environnement dans la pile est très corrosif. Ces températures sont plutôt commodes, car on peut utiliser moins de catalyseur platine, qui coûte très cher. Cependant, les AFC sont souvent mal considérées à cause des difficultés de filtration de CO_2 .

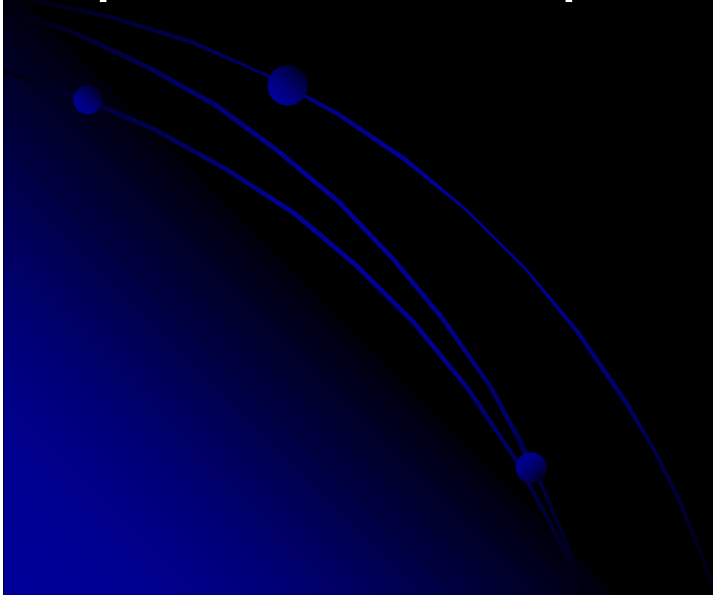
Les types de piles à combustible (suite...)

- La **PAFC** (*Phosphoric Acid Fuel Cell*) utilise l'acide phosphorique comme électrolyte. Elle fonctionne à des températures un peu plus élevées ($\sim 200^{\circ}\text{C}$). Mais, encore une fois, elle est limitée par l'environnement corrosif, bien qu'elle ne craigne pas le dioxyde de carbone. A cause de ces températures élevées, le catalyseur en platine est moins sensible à l'empoisonnement par le monoxyde de carbone.



Les types de piles à combustible (suite...)

- La **MCFC** (*Molten Carbonate Fuel Cell*) utilise un carbonate fondu comme électrolyte, et l'ion échangé est le CO_3^{2-} . Elle opère à des températures d'environ 650°C et peut donc utiliser du nickel comme catalyseur, beaucoup moins onéreux que le platine. Cependant, l'électrolyte est liquide, et corrosif, ce qui pose certains problèmes.



Les types de piles à combustible (suite...)

- La **DMFC** (*Direct Methanol Fuel Cell*) utilise une membrane comme les PEMFC, mais le carburant est le méthanol, au lieu de l'hydrogène. Cela évite la nécessité du reformage, mais diminue considérablement le rendement car le méthanol ne réagit pas aussi facilement que l'hydrogène sur le catalyseur. Elle est plutôt prévue pour des systèmes miniatures où la taille du reformeur serait un trop grand handicap, comme dans les téléphones mobiles, et les ordinateurs portables. Des recherches importantes ont déjà été lancées sur les DMFC miniatures gravées dans des couches de silicium avec les mêmes techniques utilisées dans la fabrication des micropuces. Quelques prototypes d'automobile DMFC ont été construits, mais l'inconvénient du faible rendement est plus important que l'avantage du carburant compact.

Le choix de piles à combustible

- La plupart des efforts scientifiques sont maintenant concentrée sur les PEMFC et les DMFC pour les petits générateurs à cause de leur portabilité et de leur masse volumique, et les SOFC pour les gros générateurs en raison de leur efficacité et de leur souplesse en carburant. Pour des systèmes portables, la PEMFC présente plusieurs avantages sur les autres types de piles : l'électrolyte est solide, donc il peut être formé en feuilles minces et permet d'obtenir une densité de puissance élevée, et la température est suffisamment basse pour permettre un démarrage rapide. Bien que la DMFC utilise le même type de membrane, la PEMFC donne une puissance électrique beaucoup plus importante. Les PEMFC sont les piles les plus utilisées dans les automobiles avec des prototypes déjà opérationnels chez Toyota et Honda. Le travail sur les PEMFC étant jusqu'alors le plus avancé, ce travail se focalisera donc sur celles-ci.

Pile à Combustible, les applications

Portable

Mobile

Stationnaire

Jeux
1 kW

Laptop
50 W

Mobile
2 W

Véhicule
< 100 kW

Camion
> 100 kW

Bateau
Sou marin

Centrale de Puissance
> 10 MW

Centrale
> 10 kW

Résidentiel
< 10 kW

Methanol

Gaz Naturel
Hydrogène

Charbon
Gaz Naturel

Gaz Naturel
Hydrogène
Bio Gaz

Gaz Naturel
Hydrogène

2003



2009



2008



1999



1998/2001



2005



2006



Proche à Mi terme

Long terme.....Proche terme Long terme.....Proche à Mi terme

Pile à Combustible, l'application



Pile à Combustible, l'application



Pile à Combustible, l'application

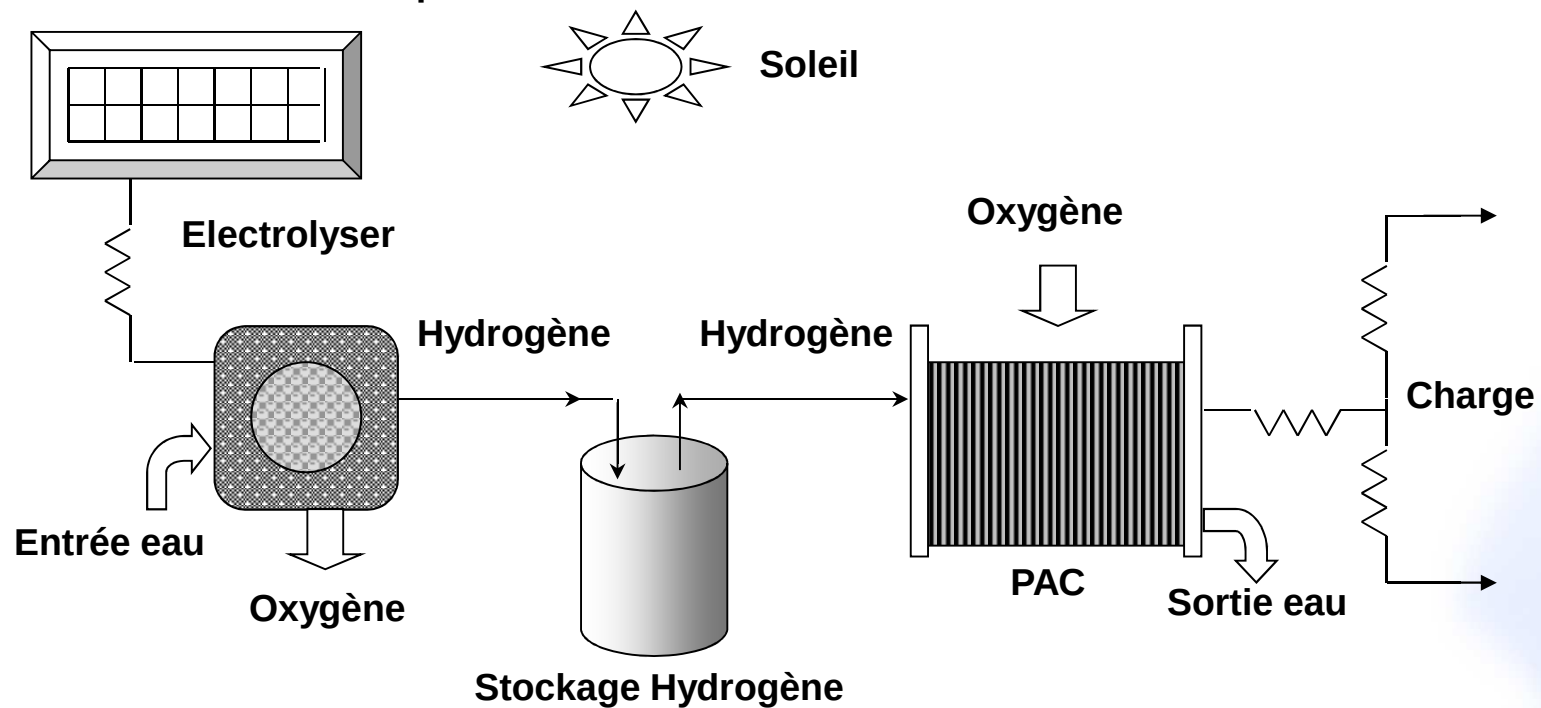


Pile à Combustible, l'application

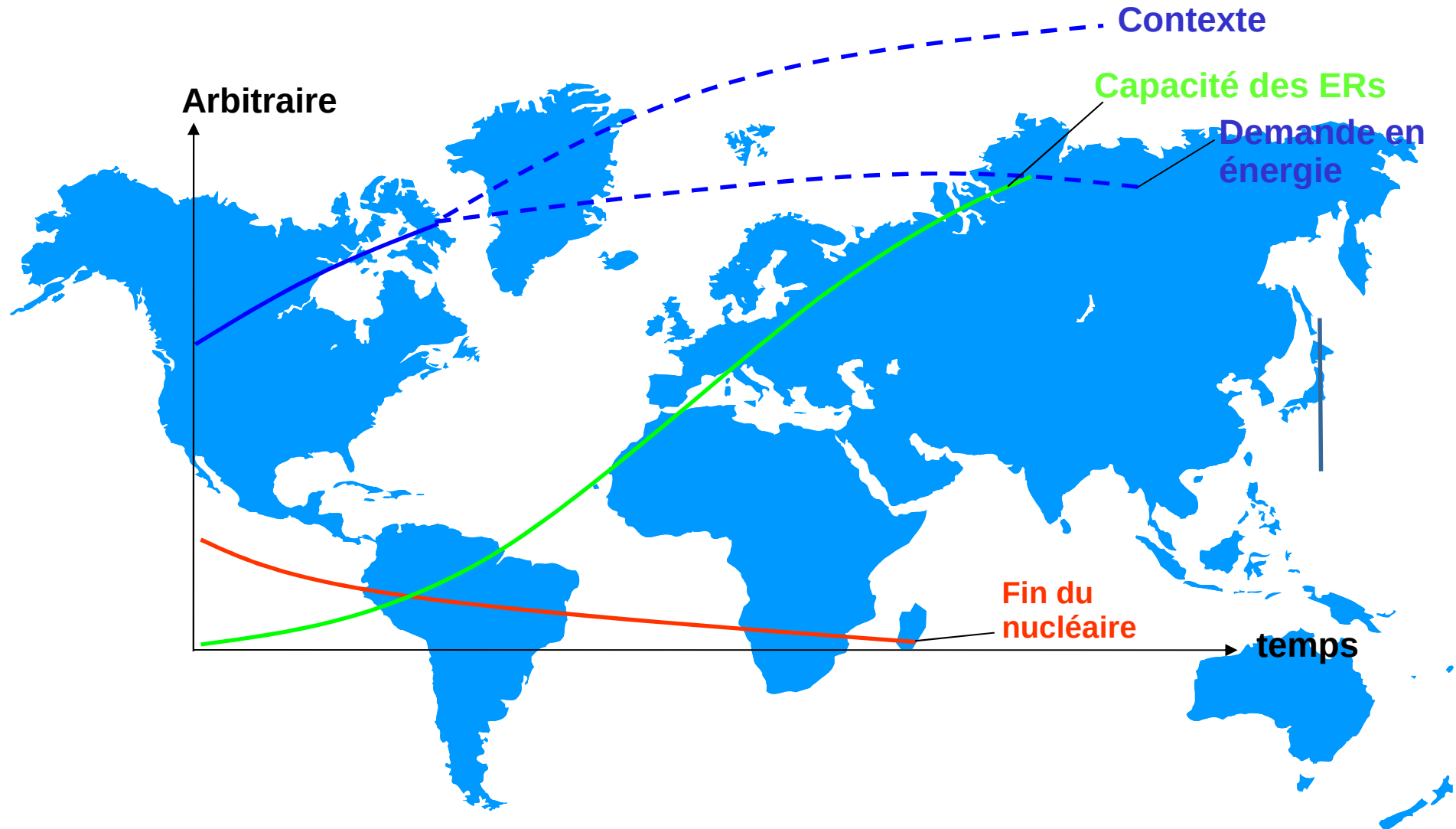


Economie d'hydrogène

Panneaux Photovoltaïques



Future des ERs

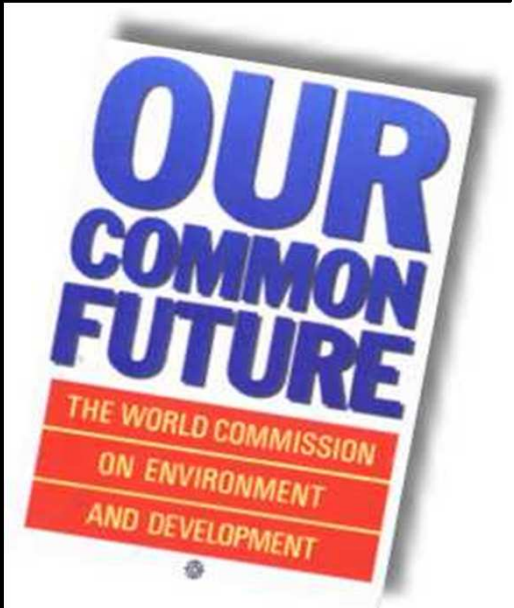


SD

WCED 1987:

“Meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”

Répondre aux besoins du présent sans mettre en péril la capacité de générations futures pour répondre à leurs propres besoins





Merci pour l'écoute et l'attention

Prof. A. Boudghene Stambouli