UNIL | Université de Lausanne

Avenir énergétique à l'horizon 2050 :

Quelles conséquences pour notre société ?

2013

Dominique Bourg, UNIL

UNIL | Université de Lausanne

PETITE HISTOIRE SOCIALE ET NATURELLE DE L'ENERGIE

Avant l'ère du charbon (19è)

- Lotka : « dans le combat pour la vie, l'avantage doit aller à ceux des organismes dont les dispositifs de capture de l'énergie en vue (...) de la préservation de l'espèce sont plus efficaces ».
- Energie solaire : production primaire et surfaces (biomasse, donc feu), eau-vent (moulins, forges hydrauliques), énergie musculaire humaine et traction animale.
- Usage très limité du charbon et de la tourbe (dès antiquité, fabrication de métaux, chauffage domestique, Londres et le smog au 13è siècle).
- Démocratie et esclavage ; charbon et fin esclavage (chacun de nous dispose d'environ 100 esclaves énergétiques ; 1 esclave : 0,5 kWh par jour) ; attention pas de simplification.

UNIL | Université de Lausanne

Histoire environnementale et révolution du charbon

PIB $ / habitant :

- An 1000 : Europe 400 $ / Asie 450 $
- 1776 : inférieur à 1 à 2
- 1870 : Afrique 444 / Europe 1974
- 1998 : Afrique 1368 / USA 26146
- 2010 : 85’600 (Qatar)/ 200 (Zimbabwe)

Efficacité tronçonneuse :

Comparativement à une hache, par exemple, une tronçonneuse augmente la productivité du travail d’un facteur allant de 100 à 1000.

UNIL | Université de Lausanne

Histoire environnementale et révolution du charbon

- Pourquoi le décollage de l'Angleterre ?
- Angleterre et région du delta du Yangzi (Chine)
- Relativement à des critères néoclassiques (système juridique, organisation des marchés, état des techniques, qualité main d'oeuvre, niveau de consommation, etc.), peut-être même supériorité de la Chine
- Alors ? Dépassement de deux goulots d'étranglement écologique : charbon et coton

UNIL | Université de Lausanne

Histoire environnementale et révolution du charbon

- Alors ? Dépassement de deux goulots d'étranglement écologique : charbon (vapeur et exhaustion eau des mines) et coton des colonies :
  - GB entre 1815 et 1900, production de charbon X 14, importation de sucre x 11, coton x 20
  - L'addition coton, sucre et bois aurait exigé en 1830 10 à 12 millions d'hectares virtuels pour une surface de 7 millions d'hectares de terres arables
  - Force motrice passe de 170'000 Cv en 1800 à 2,2 millions en 1870, 10,5 en 1907
  - En 1840, charbon : équivalent en forêt de la surface du pays x 2

UNIL | Université de Lausanne

Charbon et démocratie

- Matérialité du charbon et profil démocratique : une exploitation avec haute intensité en travail, expertise ouvrière, dépendance extrême du reste de l'économie ; chauffeurs et chargeurs ; en parallèle levier de la grève, organisation et droit syndical, grande puissance ouvrière et exigence de démocratisation de l'économie et plus forte redistribution
- Concentration industrielle autour des zones minières, accroissement des villes (émancipation de l'espace-énergie)

UNIL | Université de Lausanne

L’ère du pétrole

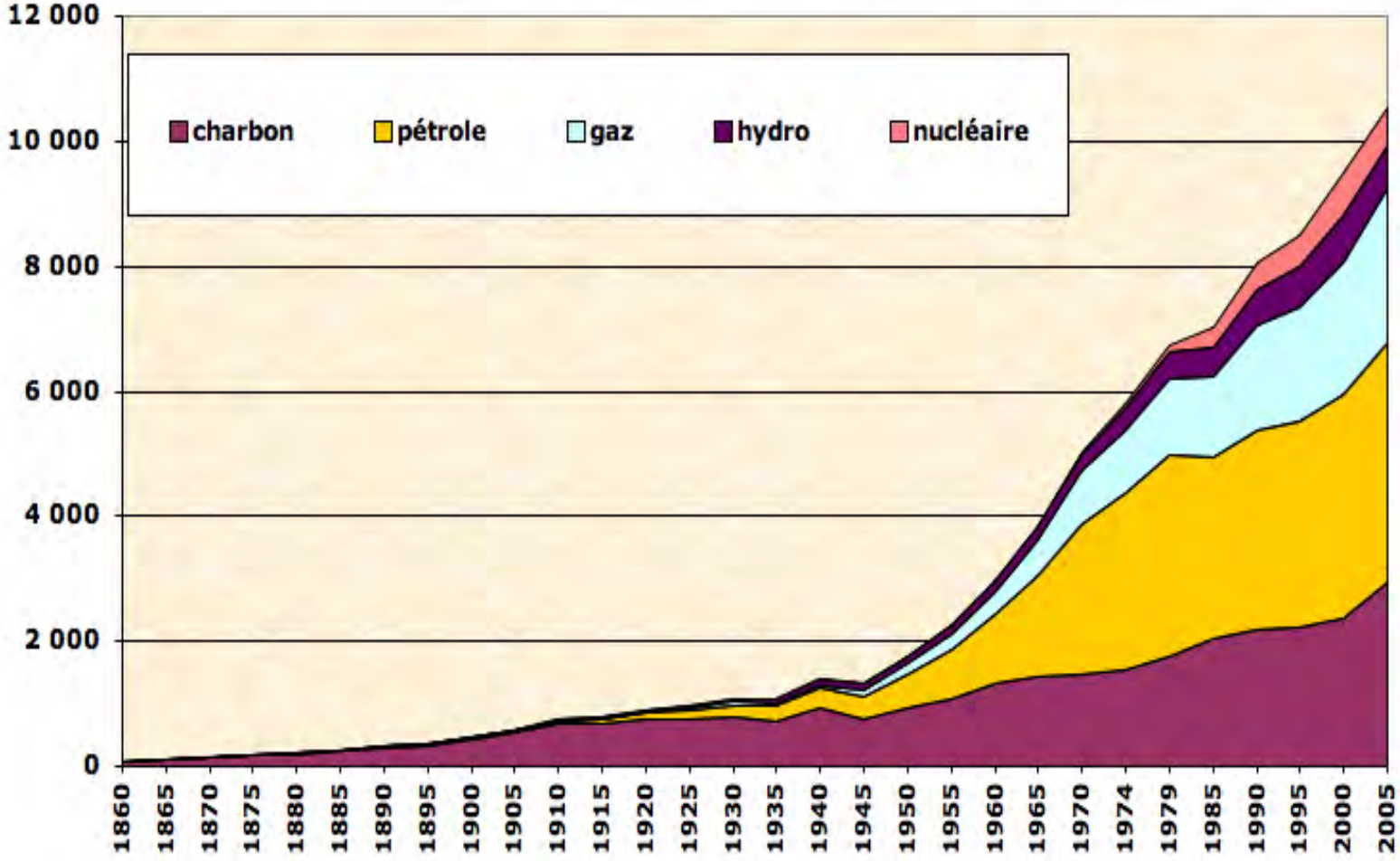
- Matérialité du pétrole et profil démocratique : faible intensité en travail et exploitation très technique, expertise et ingénierie, transport facile sans accompagnement humain ; fin du monopole et de la puissance ouvrière ; distance entre lieux d’extraction et centres industriels
- Pétrole et monnaie : GB, perte après-guerre de la maîtrise du pétrole du Proche-Orient champs et fin de la Livre sterling comme monnaie d’échange internationale ; avènement du roi Dollar

UNIL | Université de Lausanne

Le défi énergétique mondial

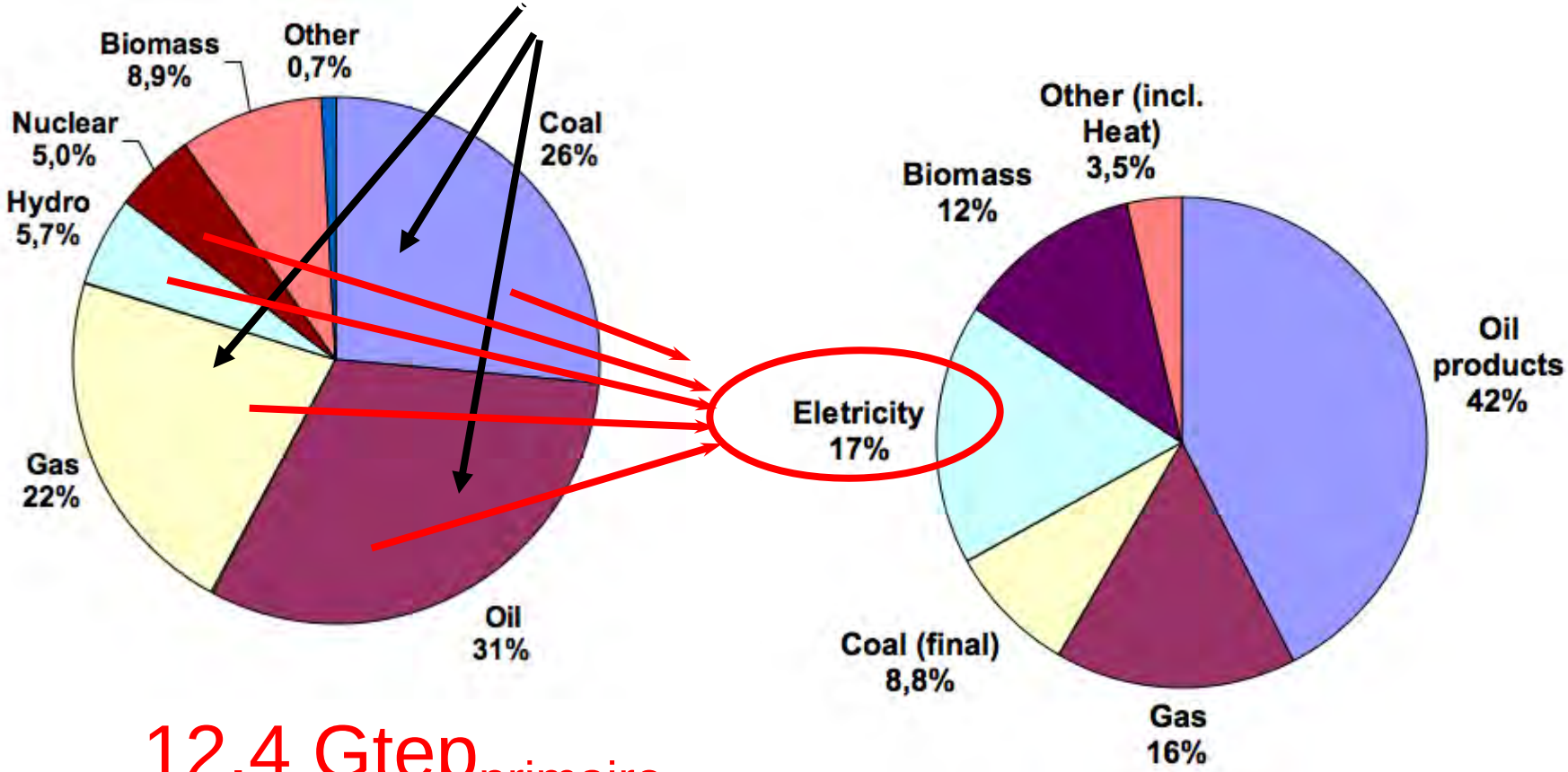
UNIL | Université de Lausanne

Consommation mondiale en Mtep (AIE)



UNIL | Université de Lausanne

Combustibles fossiles : > 75% de carbone, < 25% d' hydrogène



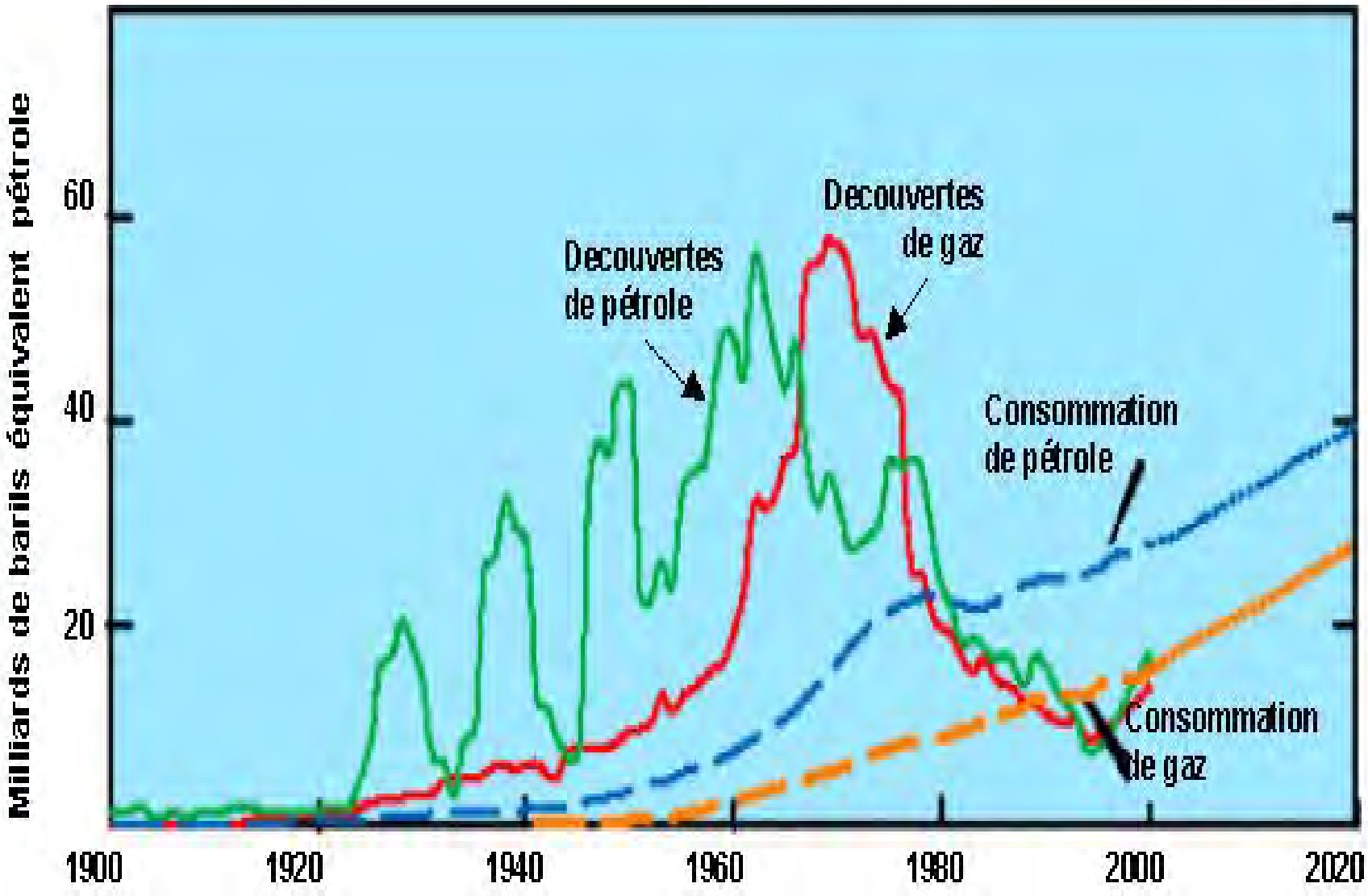
12,4 Gtep$_{primaire}$ → 8,3 Gtep$_{final}$

Source AIE 2009 Bilan énergétique mondial 2008

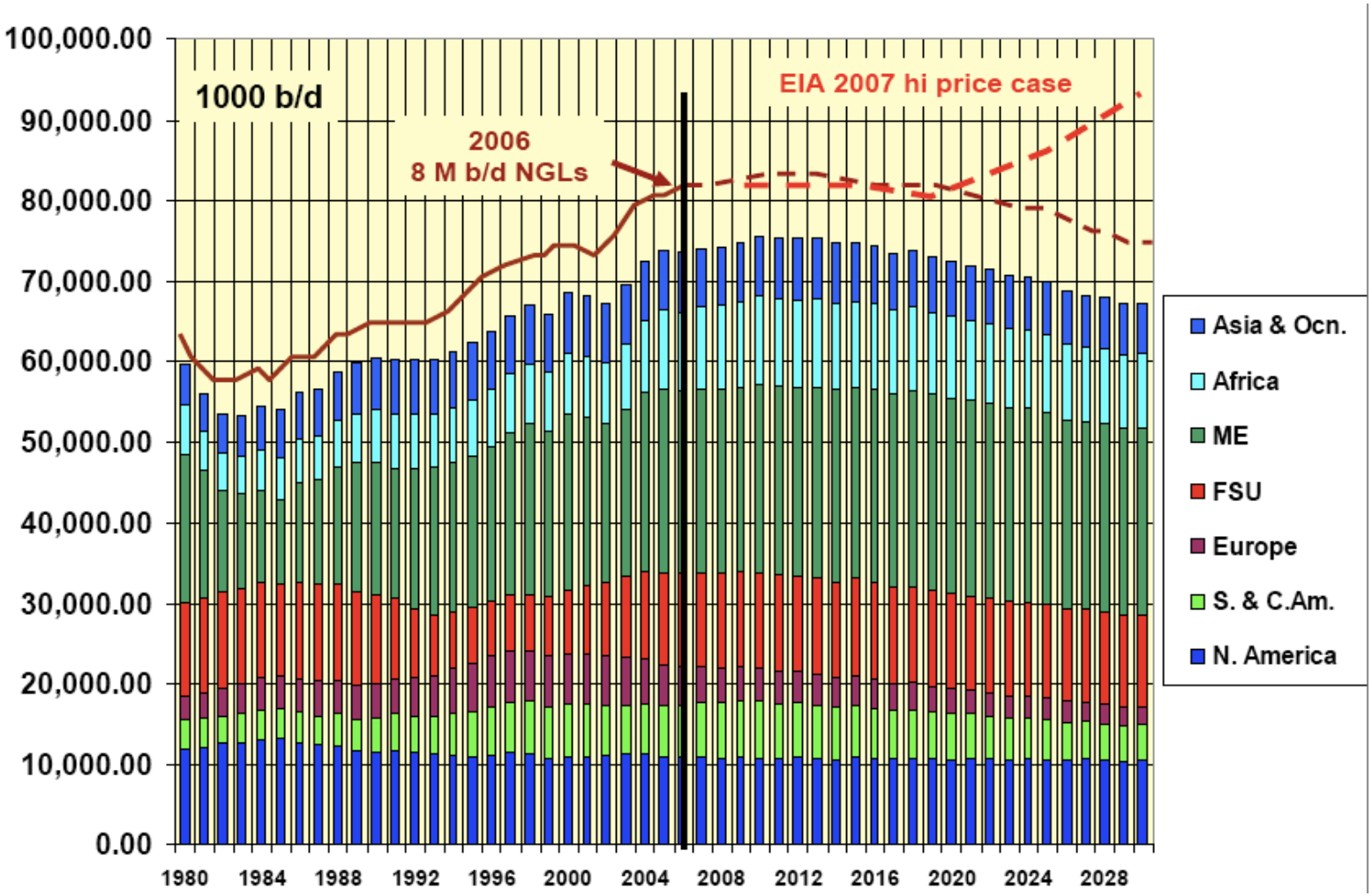
UNIL | Université de Lausanne

Le défi des ressources fossiles et des métaux

Source: Exxon Mobil, 2002



Peak Oil



Dr. Sadad I. Al Husseini, Oil and Money Conference, October 30, 2007

UNIL | Université de Lausanne

Etat des lieux: ressources fossiles conventionnelles

Atteinte du pic global en 2006 : conséquence de la courbe retraçant les découvertes de gisements depuis 1964 et du taux annuel de croissance de 3,4 points juste avant la crise de 2008 ; rattrapage en 2010.

Nos consommations énergétiques : ressources fossiles pour 80 %

Le reste : biomasse forestière, hydroélectricité et nucléaire,

Les énergies renouvelables récentes : moins de 2 %

UNIL | Université de Lausanne

Etat des lieux: ressources fossiles conventionnelles

Croissance du siècle dernier: grâce à un baril de pétrole qui s'est *grosso modo* stabilisé à 20 dollars (en dollars constants), hors des épisodes de 1973-1974 et 1979-1980

Part de l'énergie dans le PIB mondial, 4 %, sans commune mesure avec le rôle effectif de l'énergie : impossible, sans énergie, de transformer des matières, de produire de la nourriture, de transporter des biens et des personnes ou d'échanger des informations.

1 l. de pétrole = 25 t de vie marine ; énergie fossile consommée/1 an = ensemble de la vie végétale et animale sur toute la Terre pendant 450 ans

UNIL | Université de Lausanne

Etat des lieux: ressources fossiles totales

- À consommation constante (2007 année de référence) :
  - pour le gaz 250 ans,
  - pour le pétrole 140 ans
  - pour le charbon plus de 2 000 ans (300 ans si le charbon devenait notre principale source d'énergie primaire d'ici à 2050)

- Des chiffres qui fondent avec un taux de croissance de 2 % (n × 7/100 ans, × 19 si 3 %), et plus encore de 3,5 %

  Nucléaire : entre 10 000 et 20 000 ans si l'on inclut l'uranium 238 et le thorium, toujours à l'aune de la consommation de 2007

UNIL | Université de Lausanne

Etat des lieux: ressources fossiles totales

- Réserves : prouvées (exploitables à conditions techno. et éco. actuelles), probables (exploitables si) et possibles (dont 10% au moins pourraient être exploités un jour)

- Pétrole, réserves ultimes mondiales (conventionnel + liquides de gaz naturel) : entre 2000 et 3000 Gb selon les estimations les plus raisonnables dont 1128 Gb déjà consommés en 2007 ; d'où selon estimation pic désormais atteint ou au maximum en 2021

- 110 sur 70000 champs pétrolifères produisent plus de 50 % de la production mondiale, 16 sur 20 plus grands sur déclin

- Taux probable de déplétion après plateau entre 6-7 %/an

UNIL | Université de Lausanne

Sommes-nous sauvés par les non-conventionnels ?

•Aujourd'hui, sur les 90 Mb/j que nous extrayons grosso modo, un peu moins d'un tiers provient déjà de pétroles non conventionnels (*off shore* profond, pétroles lourds (Vénézuela), sables bitumineux (Canada), huiles de schiste, voire gaz ou charbon liquéfiés).

•De nouvelles techniques nous permettent cependant d'exploiter plus intensément les gisements actuels et même de rouvrir d'anciens gisements ; regain par exemple en mer du Nord ; et évidemment d'exploiter les réserves de fossiles non-conventionnels jusqu'alors inexploitables.

•Ce qui pourra au mieux prolonger le plateau

Sommes-nous sauvés par les non-conventionnels ?

- Extraction d'un baril canadien : 100 Kg CO_2 ; 10 pour Arabie Saoudite
- Dans le Nord du Dakota, on brûle même le gaz qui sort avec les huiles de schiste !
- L'abondance du gaz de schiste aux USA, son bas coût (1/3 prix gaz soviétique), conduisent les USA à exporter leur charbon, notamment en Europe
- Les non conventionnels sont plus polluants et présentent un impact CO_2 sensiblement plus fort
- EROEI (*Energy Return On Energy Investment*) : autrefois pour une unité 1 investie 100 reçues, aujourd'hui 11 pour les conventionnels difficiles à atteindre, 6 pour les sables bitumineux et entre 3 et 1 pour les agrocarburants

Le cas du gaz de schiste

Problèmes :

- Grande consommation de ressources (eau et acier)
- Polluants chimiques (non régulés par l'EPA aux USA ; aux USA tjs eau polluée, ni retraitée ni recyclée)
- Emissions de méthane/climat (plus sale que charbon)
- Abondance présumée en Chine (mais plus profonds qu'aux USA ; idem pour Pologne) et en Europe (GB et France)
- Aux USA, Barnett et Haynesville, *déjà sur déclin*

Importance d'une approche systémique des risques

Etat des ressources : métaux

- L'état des stocks des métaux sous tension (estimation – 2009 - à partir des gisements en cours d'exploitation) :
  - Or : 22 ans ; Zinc et étain : 18 ans (coproduits : indium et galium)
  - Argent : 15 ans ; Plomb : 20 ans (cpt : cadmium)
  - Cuivre : 34 ans (cpts : sélénium et terbium) ; fer : 50 ans
  - Palladium : 15 ans
- Qualité et accessibilité se dégradent, cas du cuivre : concentration moyenne de 1,8 % en 1930, aujourd'hui 0,5 % (s'il fallait produire la quantité de cuivre annuelle à partir d'état de dispersion naturelle = toute l'énergie primaire mondiale/an)
- D'autres gisements moins riches et plus profonds, donc à un coût énergétique d'extraction croissant ; la connaissance du sous-sol reste limitée à la tranche 0 à – 100 m, alors que l'on sait exploiter à – 3'000 m
- Différence gigantesque entre réserves et ressources totales (par ex. : aluminium et fer : 8 et 5 % du poids croûte terrestre)

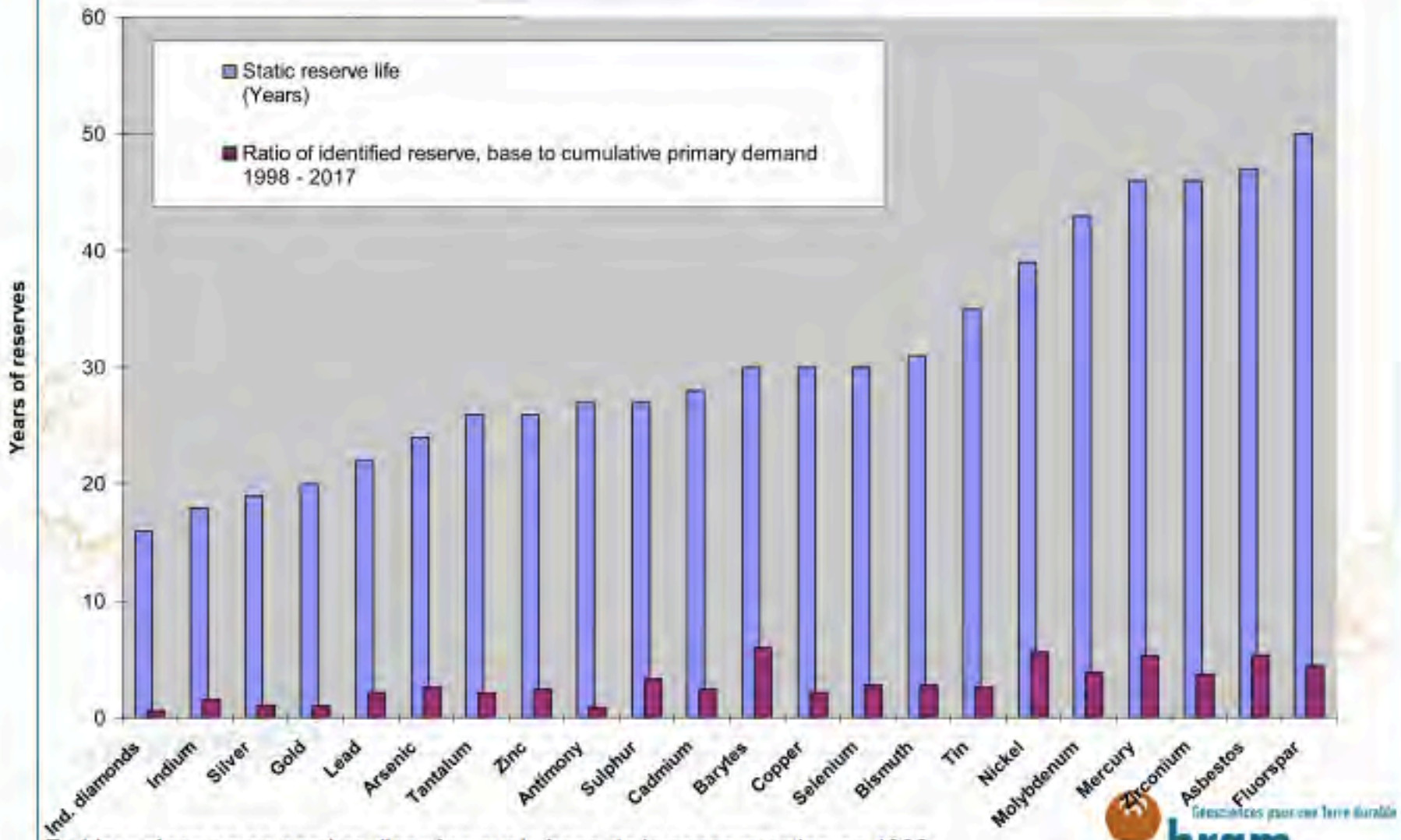
Etat des ressources : métaux

- Production d'acier augmentée par 30 au 20è siècle
- Cuivre : ressource totale : 1600 Tg (millions de tonnes) ; or en 2050, si niveau de services actuel sur toute la planète, besoin de cuivre = 2000 Tg !
- Si en 2050, planète sans fossiles avec 9,3 B/pop et 2.5 énergie primaire de 2005 = panneaux solaires à couche mince (rareté cadmium, galium, indium, tellure et sélénium) 1 % ; les éoliennes exigeraient 180 fois actuelle production de néodyme (aussi utilisé pour voitires électriques, impossible), sans évoquer autres métaux ; pour piles à combustibles (hydrogène), le besoin annuel de platine serait de 39'000 t., impossible aussi ; pour lignes HT, 70 fois production annuelle de cuivre !
-

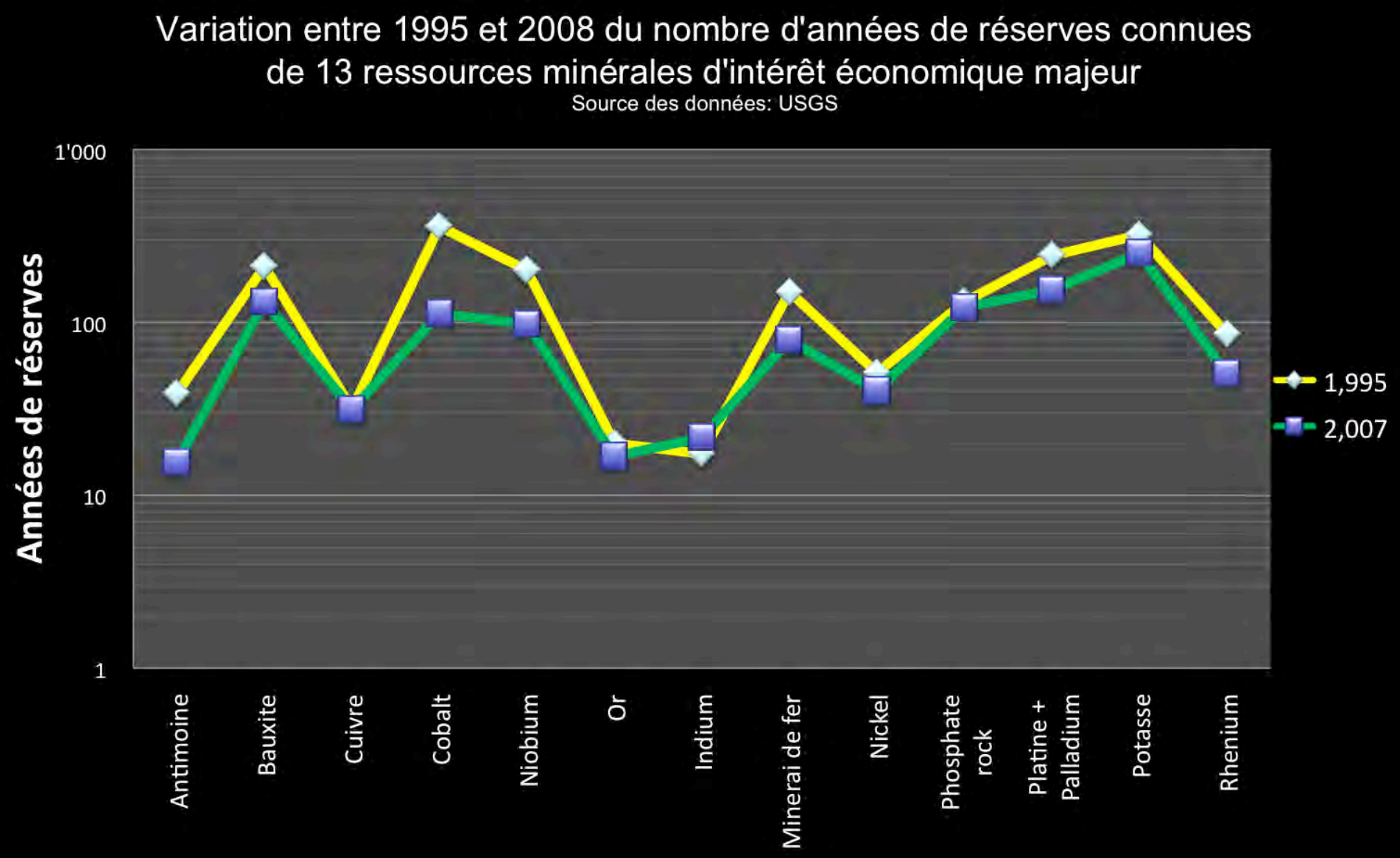
Etat des ressources : métaux

- **Métaux critiques** selon UE (*Critical raw material for EU*, 2010) + *Minerals, Criticals Mineral, and the US Economy*, 2007, croisés = indium, galium, niobium, métaux du groupe platine et terres rares ; s'y ajoutent : néodyme et dysprosium et tous liés aux techniques énergétiques : goulots d'étranglement

Réserves minières exprimées en nombre d'années



En bleu; réserves en nombre d'années sur la base de la consommation en 1998
En violet; réserves en nombre d'années, mais avec la consommation cumulée affectée de la croissance 1998-2008


Variation entre 1995 et 2008 du nombre d'années de réserves connues
de 13 ressources minérales d'intérêt économique majeur
Source des données: USGS
Années de réserves
1'000
100
10
1
Antimoine
Bauxite
Cuivre
Cobalt
Niobium
Or
Indium
Minerai de fer
Nickel
Phosphate rock
Platine + Palladium
Potasse
Rhenium
1,995
2,007

UNIL | Université de Lausanne

Etat des ressources : métaux

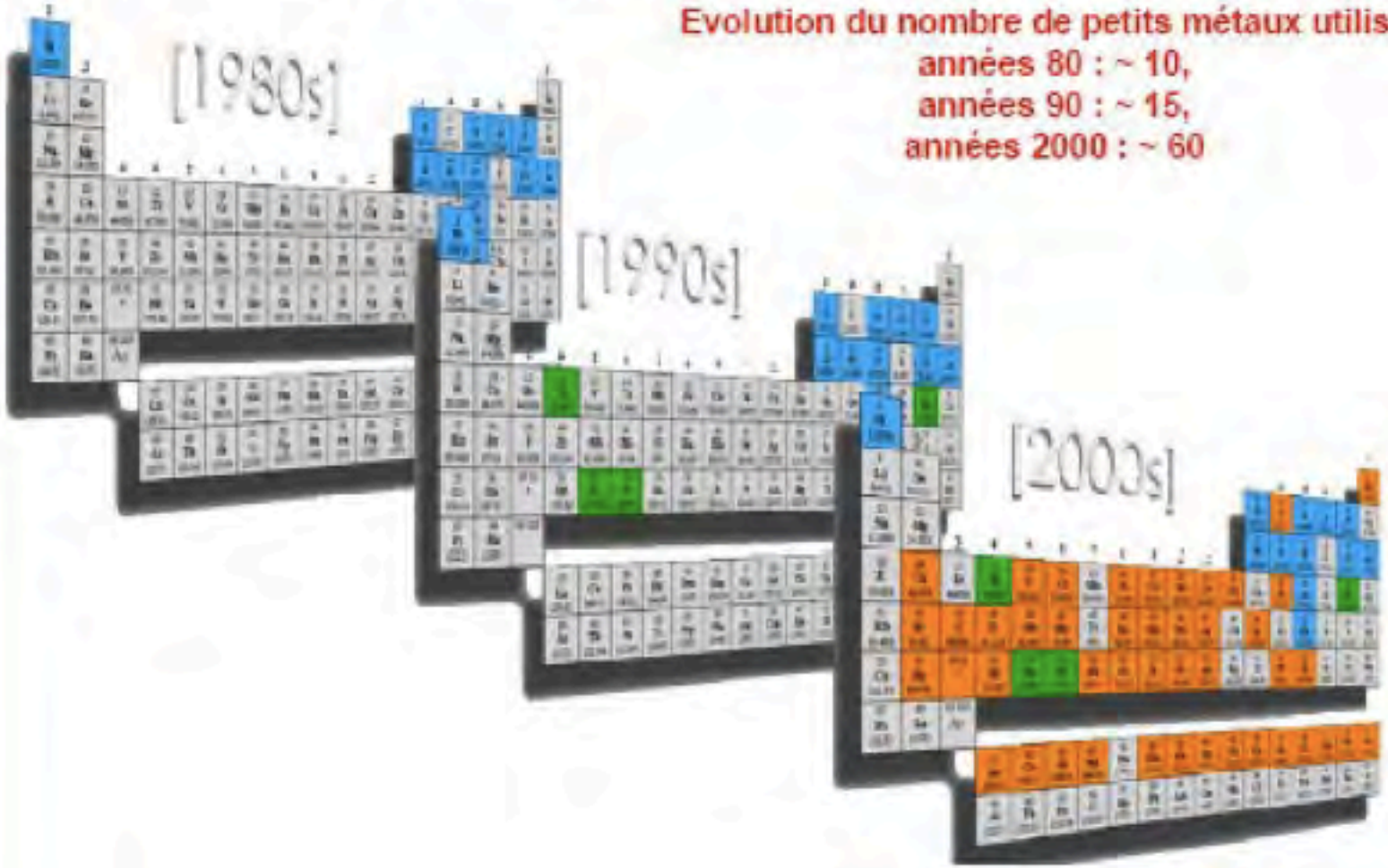
D’autres limites :

- Nous exploitons, depuis les années 2000, à peu près les deux tiers des métaux de la table de Mendeleïev, soit une soixantaine de petits métaux (le tantale, l’indium, le lithium, le niobium, le titane, les terres rare, etc.), et ce pour les technologies de l’information et de la communication, l’aéronautique, les technologies vertes notamment dans le domaine de l’automobile

- Ces métaux présentent des propriétés spécifiques qui les rendent difficilement substituables (pour 1 fonction donnée : tjs un meilleur matériau possible comme cuivre pour transport électricité

Une table de Mendeleïev de plus en plus sollicitée
diversification de l'économie vers les « petits métaux »

Evolution du nombre de petits métaux utilisés
années 80 : ~ 10,
années 90 : ~ 15,
années 2000 : ~ 60



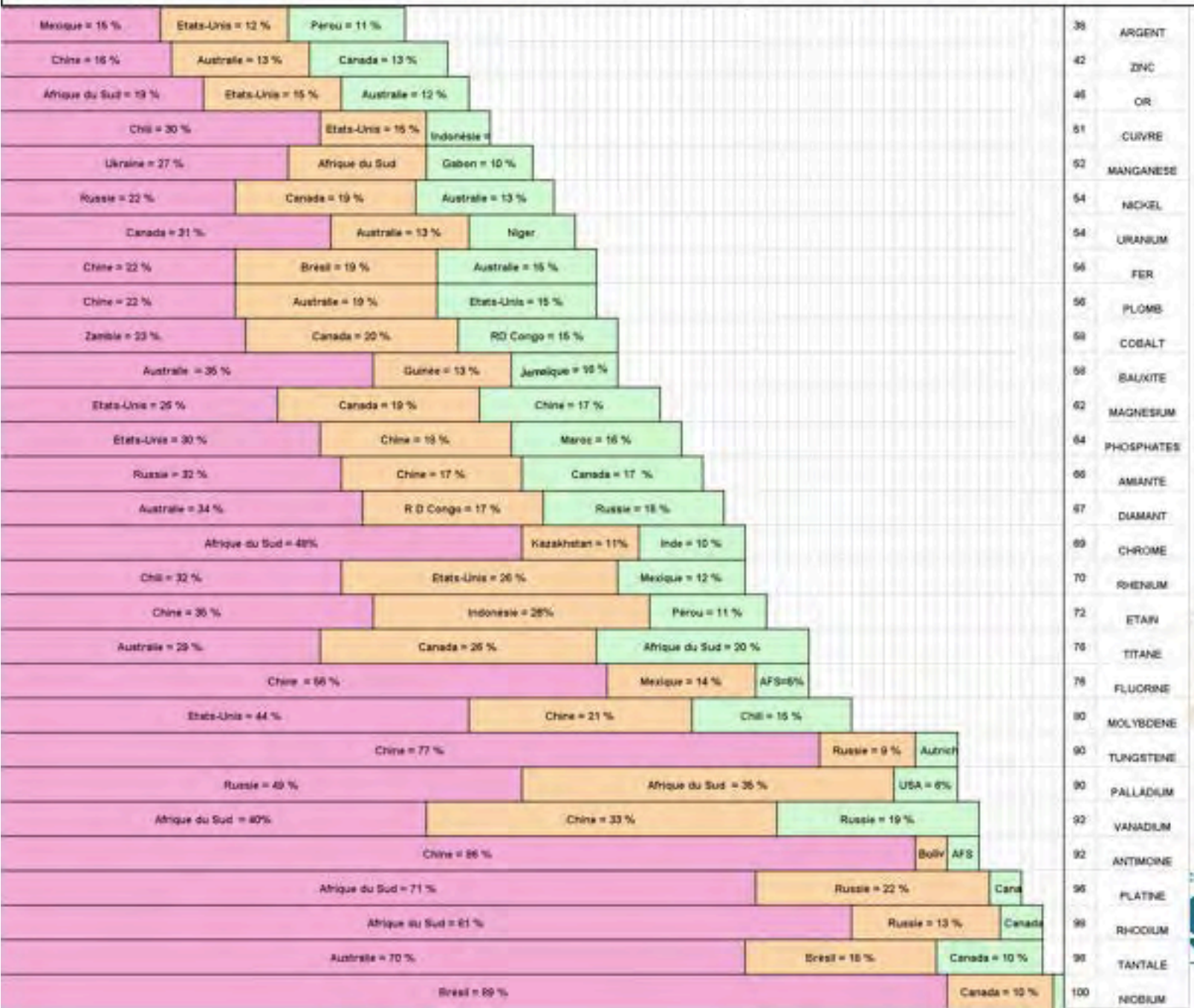
Géosciences pour une Terre durable
brgm

UNIL | Université de Lausanne

Etat des ressources : métaux

- Les réserves se trouvent dans un petit nombre de pays producteurs :
- Chine, par exemple, les trois quarts des réserves exploitées de tungstène et 95 % des terres rares
- Bolivie, Chili et Argentine : 90 % du lithium
- BRIC : 85 % du fer

Concentration des productions minières dans le monde: part des 3 premiers pays producteurs



ciences pour une Terre durable

gm

Matières premières nécessaires au secteur de l'énergie provenant de l'industrie minérale (à l'exception des gaz: H, He, Ne, Ar, Kr et Xe)

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh		Uuo

Lanthanides (Rare Earth)	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Hm	Er	Tm	Yb	Lu
Actinides	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- Stockage de l'énergie
- Connectique
- Economies d'énergie
- Catalyse (automobile, piles à combustible)
- Production et transport de l'électricité
- Industrie électrique nucléaire
- Photovoltaïque
- Aimants permanents (véhicules électriques, éoliennes, TGV...)
- Eclairage
- Supraconducteurs

Compilation: P. Christmann, BRGM

Etat des ressources : métaux

- **Recyclage :**

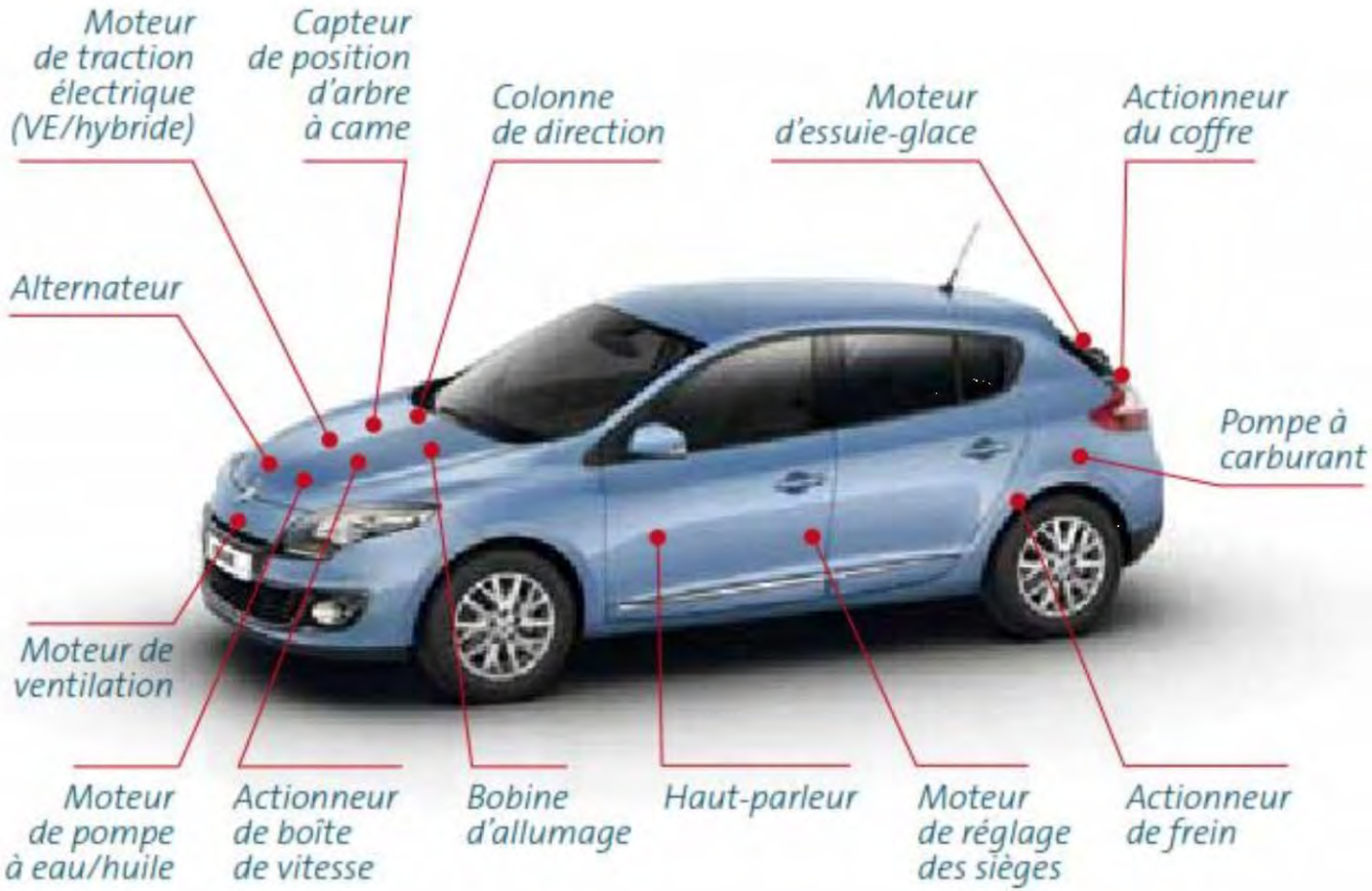
- Avec par exemple l'actuelle croissance de la production annuelle d'acier, soit 3,5 %, un taux de recyclage de 62 % ne fait que reculer de 12 ans l'épuisement des ressources estimées de fer (moins de cinq décennies). Seul un taux de croissance de la consommation inférieur à 1 % assurerait une efficacité au recyclage (plus de trois siècles).

- Cuivre : 8 Mt/1970 ; usage 40 à 60 ans ; même si revient totalité avec recycl. ajd'h, avec conso de 24 Mt, manquent 16 Mt. Sans compter assemblages, alliages et dispersion.

(Source : François Grosse, « Le découplage croissance/ matières premières. De l'économie circulaire à l'économie de fonctionnalité : vertus et limites du recyclage », in *Futuribles*, n° 365, juillet-août 2010, p. 99-124).

Aimants permanents dans un véhicule standard (Renault, Europe, 2011)

Source: P. Schulz, in Géosciences n° 15

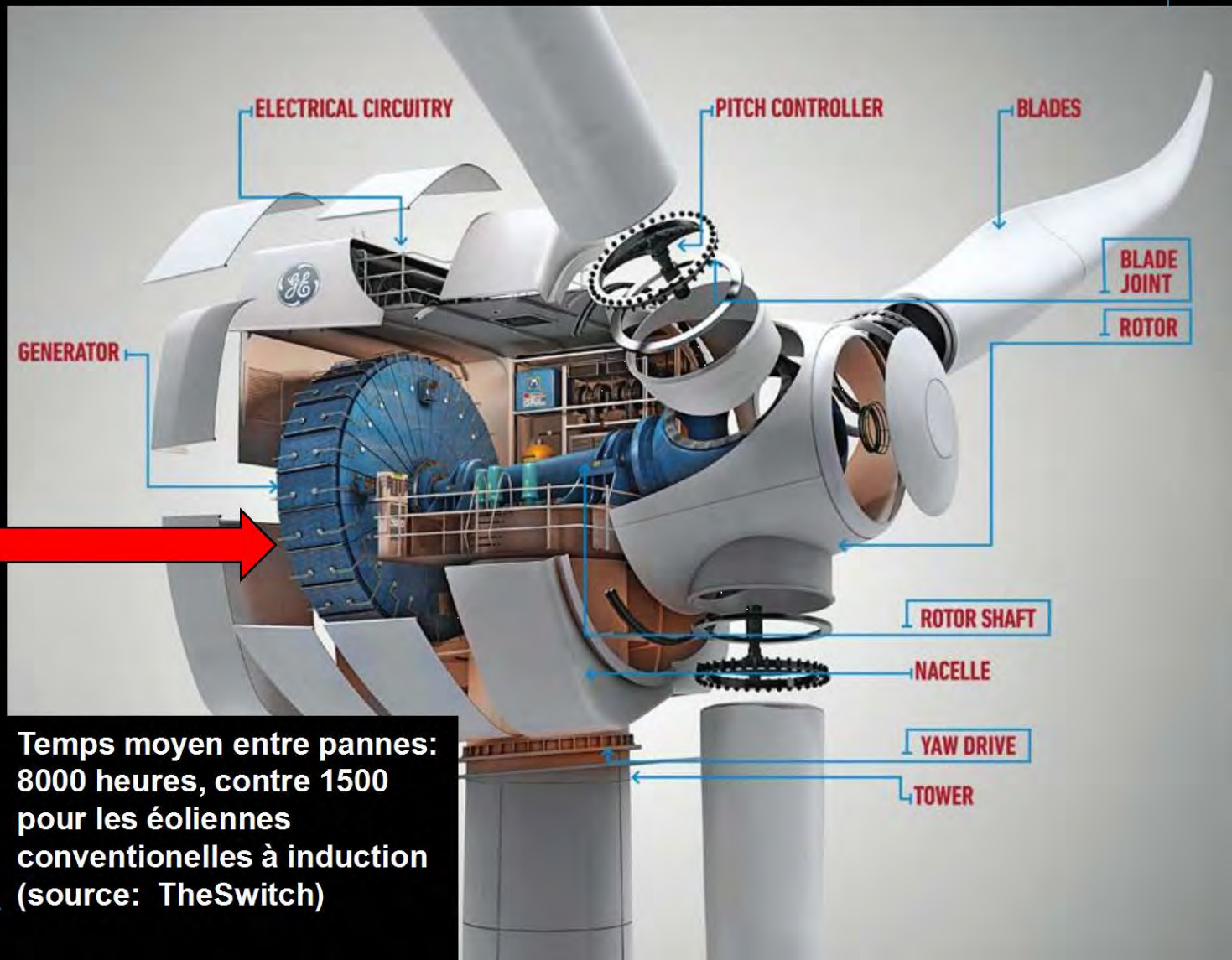


Géosciences pour une Terre durable
brgm

L'une des applications phare des terres rares: les éoliennes à entraînement direct à base d'aimants permanents (Image: General Electric, Données: US Department of Energy)

Par MW installé de capacité de production :

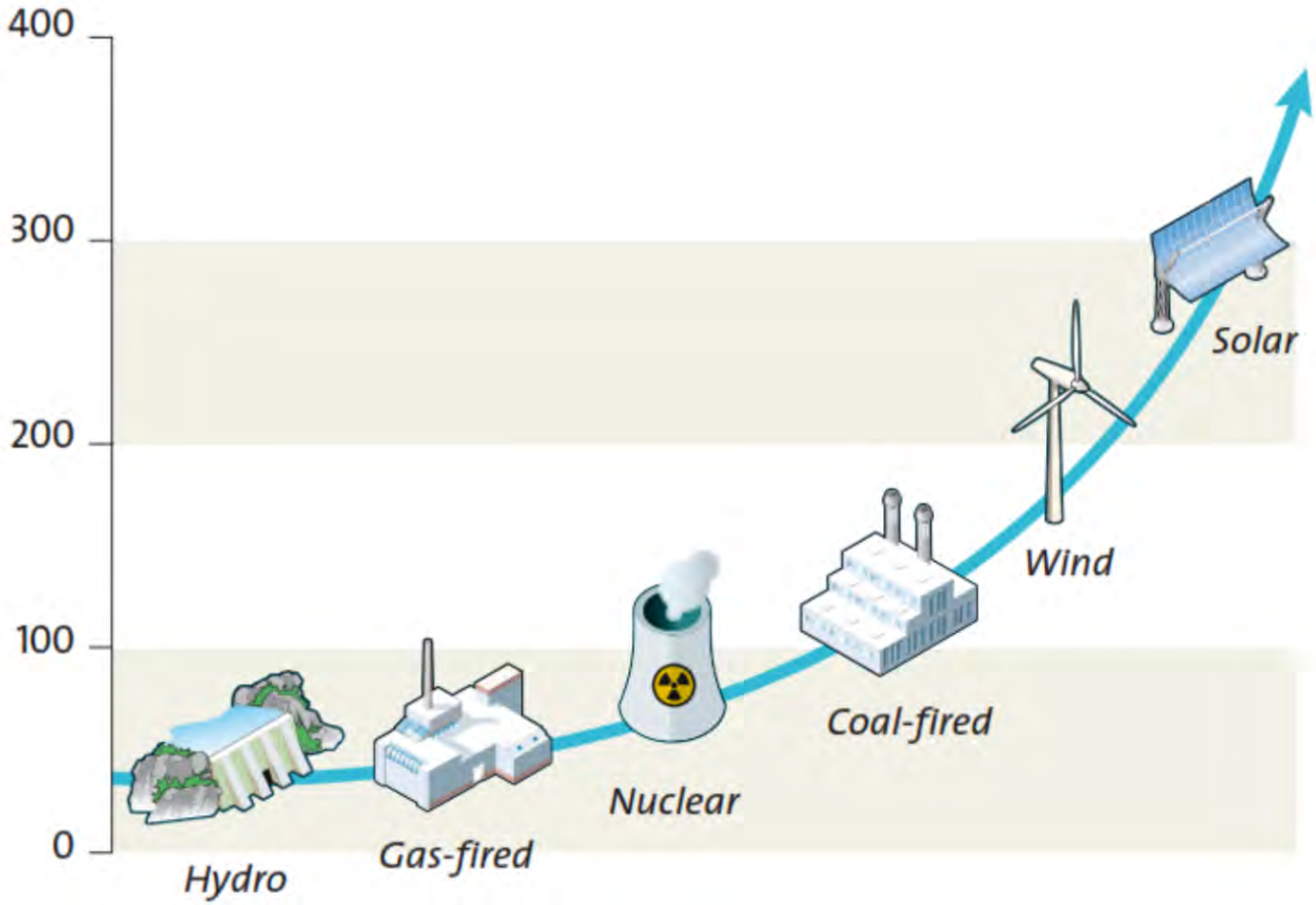
- **+/- 600 kg d'aimants permanents Nd-Dy-Fe-B magnets**
- **4,1% Dy = 24,6 kg**
- **31% Nd = 186 kg**



Temps moyen entre pannes: 8000 heures, contre 1500 pour les éoliennes conventionelles à induction (source: TheSwitch)

Intensité matérielle de différentes technologies de production électrique: tonnes d'acier par MW de capacité installée

Source: Rio Tinto Investor Seminar 2011, Sidney et Géosciences n° 15



géosciences pour une Terre durable
brgm

Nom du service émetteur

Energie / métaux

Nous sommes pris en tenaille :

- l'extraction et le traitement des minéraux demanderont de plus en plus d'énergie (aujourd'hui : 8–10 % énergie mondiale)

- la production d'énergie demandera de plus en plus de minéraux (10 fois plus de métaux par kWh/renouvelable que par kWh/thermique)

UNIL | Université de Lausanne

Le défi démographique

UNIL | Université de Lausanne

Evolution de la population mondiale

- Avant le néolithique : quelques millions
- Début ère chrétienne : 350 Millions
- 1900 : 1 Milliard
- 1950 : 3 Milliards
- 2000 : 6 Milliards
- 2013 : 7,2 Milliards
- 2025 : 8,1 Milliards
- 2050 : 9,6 Milliards

Conséquences en termes de consommation de ressources et d'espaces (43 % de surfaces artificialisée, 50 % avec 8,2 Mds)

UNIL | Université de Lausanne

L’enjeu majeur

- « Ici nous récapitulons les preuves selon lesquelles des transitions critiques à une échelle planétaire se sont déjà produites au sein de la biosphère, quoique rarement, et que désormais les hommes sont en train de provoquer une transition comparable, qui pourrait faire basculer rapidement et de manière irréversible la Terre vers un état jamais expérimenté par le genre humain. »

- BARNOSKY A. D. *et al.,* « Approaching a State Shift in Earth’s Biosphere », *Nature,* 7 June 2012, Vol. 486

UNIL | Université de Lausanne

Le défi climatique

UNIL | Université de Lausanne

Sommes-nous sauvés par les non-conventionnels ?

- Extraction d'un baril canadien : 100 Kg CO_2 ; 10 pour un baril extrait en Arabie Saoudite

- D'autres limites et contraintes/climat :
  nous avons déjà consommé ***le tiers de notre « budget*** *cumulé d'émissions » pour la période 2000-2050 si nous voulons avoir une chance de maintenir l'élévation de la température, d'ici à la fin du siècle, en dessous de 2°*

- En réalité un objectif désormais hors d'atteinte ; d'où importance également des efforts d'adaptation

L'équation de Kaya

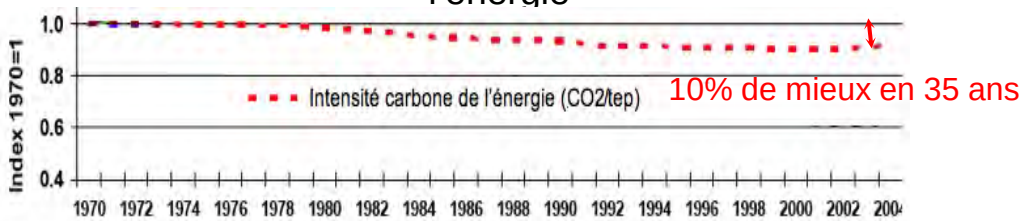
UNIL | Université de Lausanne

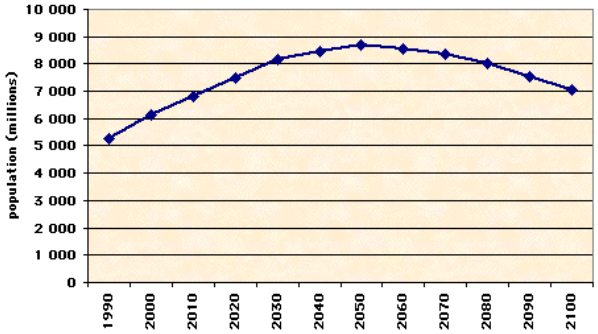
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} * \frac{TEP}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

A diviser par 3

Emissions de gaz carbonique = Contenu en gaz carbonique de l'énergie * Intensité énergétique de l'économie * Production par personne * Population

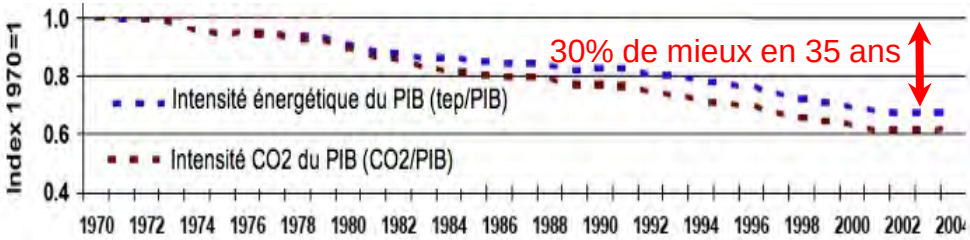
« Magic technique » N° 2 : l'efficacité carbone de l'énergie





+ 35% d'ici 2050

« Magic technique » N° 1 : l'efficacité énergétique



Gain de 34% en 40 ans

Le PIB par personne est stable (<=> ÷ par 3 à 4 en Occident)

L’enjeu majeur

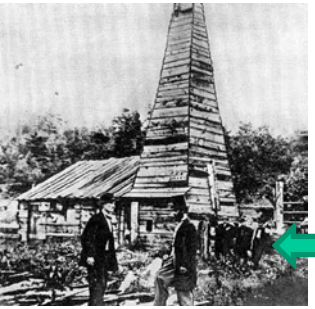
« Dans un monde de plus 4° , écrit par exemple R. Warren, les limites à l’adaptation humaine sont probablement dépassées dans de nombreuses parties du monde, alors que celles propres aux systèmes naturels sont largement dépassées dans le monde entier. En conséquence, les services écosystémiques dont dépendent les modes de vie humains ne pourraient être préservés. Même si des études ont suggéré que l’adaptation devrait être possible dans quelques aires pour les systèmes humains, de telles études n’ont généralement pas pris en compte la perte des services écosystémiques. »

R. Warren« The Role of Interactions in a World Implementing Adaptation and Mitigation Solutions to Climate Change », in dossier « Four Degrees and Beyond : The Potential for a Global Tempe- rature Increase of Four Degrees and its Implications », *Philosophical Transactions of the Royal Society A,* January 13, 2011

Le défi technique

➔ La loi des rendements décroissants

- **E**nergy **R**eturn **O**n **E**nergy **I**n



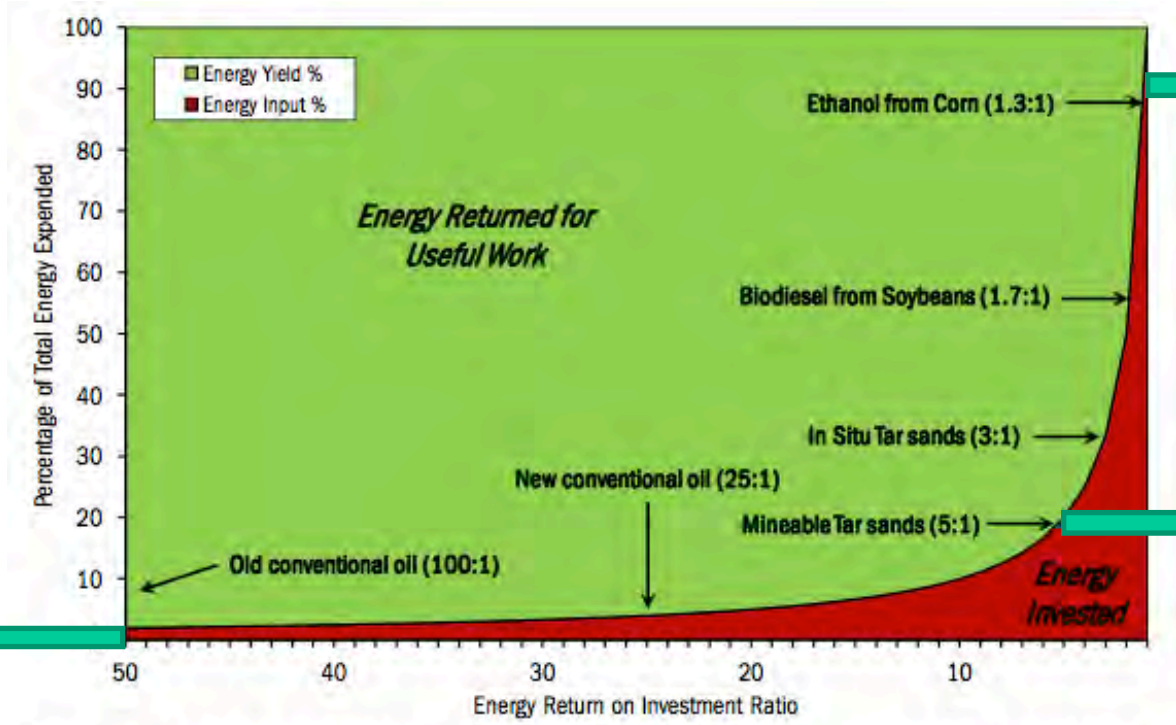


Figure 38. Energy available to do useful work as a proportion of total energy expended.

Source : Carbone 4

CONCLUSION
ENJEUX GLOBAUX

- Une demande en forte croissance…
  - Démographie
  - Croissance du PIB mondial : tirée par les émergents
  - + de 2 %/an depuis 30 ans, plus de 3 % avant la crise

    ; + 50 % d'ici à 2035
- … confrontée à des limites :
  - Des coûts de production croissants
  - *Peakoil* et finitude des ressources fossiles
  - Finitude des ressources minérales/accroissement du coût énergétique d'extraction et de traitement
  - Finitude climatique : émissions de CO2 x 2 entre 1971 et 2011
  - L'objectif des 2° : désormais impossible
  - Si 4 ° (possible à compter de 2060), scénario catastrophe avec chute des capacités de production alimentaires mondiales

UNIL | Université de Lausanne

LE DEFI ENERGETIQUE SUISSE

Suisse : état des lieux

- Une consommation énergétique stable (depuis 1990), mais un report vers l'électricité, et donc une consommation d'électricité croissante
- Electricité : 24,8 % énergie finale (35 % carburants, 18,7 pour les combustibles, 12,2 % pour gaz et 9,3 % reste)
- 850 sociétés électriques (privées mais actionnariat plutôt public)
- Répartition : 40,7 % nucléaire ; 5,6 % thermique ; 30,3 % centrales à accumulation et 23,4 % au fil de l'eau
- Suisse : touchée par la crise européenne avec surproduction et baisse du prix du KWh

Suisse : les défis

- Sortie du nucléaire sans re-carboner l'énergie
- Remplacement de Mühleberg : 850 éoliennes de 2 MW ou 690 Palexpo (aujourd'hui 8 éoliennes et 30'000 m^2 ; énergie et non puissance)
- Défi du bâti ; défi chauffage et transports
- Fonte des glaciers ; changement du régime des pluies
- Gaz de schistes : coût du gaz naturel aux USA : 1/3 du gaz en Europe
- Vieillissement du réseau et nécessité de faire face au développement des ENR
- Défi du stockage pour les ENR (en attendant, décarbonisation relative)

Suisse : les défis

- Le paquet climat-énergie européen : 20 x 3 à l'horizon 2020 : 20 % de renouvelables, réduction de 20 % des émissions de CO_2, réduire de 20 % la consommation énergétique ; mais dérogations depuis 2008.
- Suisse : révision de la loi sur le CO_2 : moins 20 % de CO_2 en 2020.
- Stratégie énergétique 2050 :
  - Le Conseil fédéral veut diminuer la consommation d'énergie et d'électricité. La consommation moyenne d'énergie par personne et par an doit être réduite de 16 % par rapport à l'an 2000 à l'horizon 2020, et de 43 % à l'horizon 2035. Il est prévu de développer la production annuelle de la force hydraulique pour atteindre au moins 37 400 GWh et de faire progresser la part des autres énergies renouvelables à 11 940 GWh d'ici à 2035.
- Le programme SuisseEnergie (55 millions à compter de 2015) :
  - Développer éolien, géothermie et tout particulièrement photovoltaïque ;
  - Aide à l'investissement pour les petites installations photovoltaïques
  - Promotion renforcée de la géothermie profonde
  - Planification conjointe, par les cantons et les communes, du développement des renouvelables, la Confédération assurant la coordination

Conclusion

- Règle d'or : sobriété : produire des négawatts !
- Promouvoir l'efficacité énergétique chez le client
- Décarbonisation (de et) par l'électricité (amélioration des procédés, transports électriques, etc.)
- Associer service et production (conseil aux particuliers et aux PME, considérer les modes de vie, compteurs intelligents, domotique, etc.)
- Etre attentif à la construction d'une économie circulaire (choix des matériaux)
- Regarder aussi les possibilités *lowtech* (des matériaux plus disponibles, robustesse, un recyclage plus facile)