

Les grands défis énergétiques du 21^{ème} siècle

Economies d'énergie dans les bâtiments

Hans Björn (Teddy) Püttgen

Professeur, Chaire de Gestion des Systèmes Energétiques

Directeur, Energy Center

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Georgia Power Professor Emeritus, Georgia Institute of Technology

Banque Cantonale Vaudoise

Lausanne

4 mars 2009

Les trois grands défis du 21^{ème} siècle



Une large disponibilité de services de santé, tant cliniques que préventifs, de par le monde.



La production et la distribution de nourriture à des prix abordables mondialement.

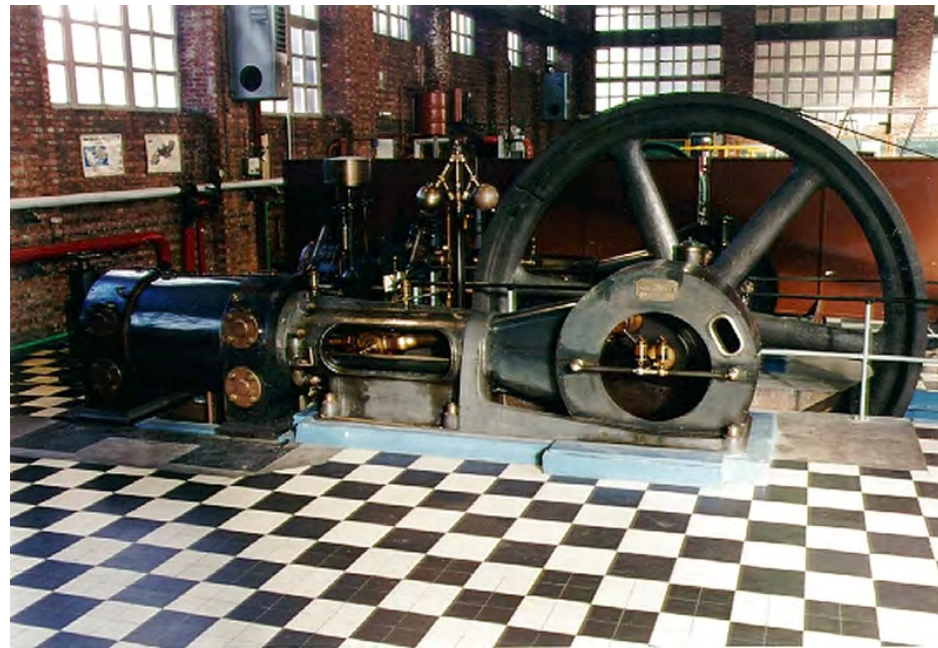


Ressources et cycle de l'eau
Production, stockage, transport, distribution et utilisation rationnelle de l'énergie.

Arrière plan – 19^{ème} siècle

- Le début de la révolution industrielle a eu lieu au 19^{ème} siècle avec l'invention de la machine à vapeur à la fin du 18^{ème} siècle.
- L'ère de la consommation intense de charbon est dès lors lancée.

Le 19^{ème} siècle a été celui du charbon.



Arrière plan - 20^{ème} siècle

- L'électricité a été le moteur du développement économique au début du 20^{ème} siècle.
- La révolution de la communication et de l'information a eu lieu durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle, grâce aux technologies du semi-conducteur.
- La révolution des transports a également eu lieu durant le 20^{ème} siècle.

Le 20^{ème} siècle a été celui des hydrocarbures.



Arrière plan – pétrole

- La fin de l'ère pétrolière aura lieu durant le 21^{ème} siècle.
- Alors qu'il est difficile de prédire la date exacte, la pointe de la production pétrolière aura probablement lieu durant la première moitié du 21^{ème} siècle.
- La volatilité des prix des hydrocarbures est un véritable problème:
 - A \$145 le baril, des technologies d'extraction plus difficiles deviennent rentables ainsi que les huiles lourdes (Venezuela) ou les sables bitumeux (Rockies en Amérique du Nord)
 - Un prix de \$50 le baril ces mêmes technologies et ressources ne sont plus attrayantes
- Le temps du pétrole bon marché est probablement révolu alors que les niveaux de prix futurs seront avant tout dictés par les coûts d'extraction.

La concurrence des besoins internes dans les pays émergents également producteurs commence à peser sur les marchés.

Explosion démographique

- En 2050, la population mondiale aura atteint 9,1 milliards de personnes, une augmentation de 2,6 milliards par rapport à la situation en 2005.

La population va non seulement croître d'une manière dramatique, mais sa distribution va également évoluer.

- La population de l'Europe va décroître de 730 millions à présent à 650 millions.
- La population de l'Afrique va exploser à 1'940 millions contre 910 à présent.
- La population de l'Asie va atteindre 5,2 milliards contre 3,9 milliards à présent.
- En 2050, l'Inde sera le pays avec la plus forte population avec 1,6 milliards contre 1,4 milliards en Chine.

Source: Nations Unies

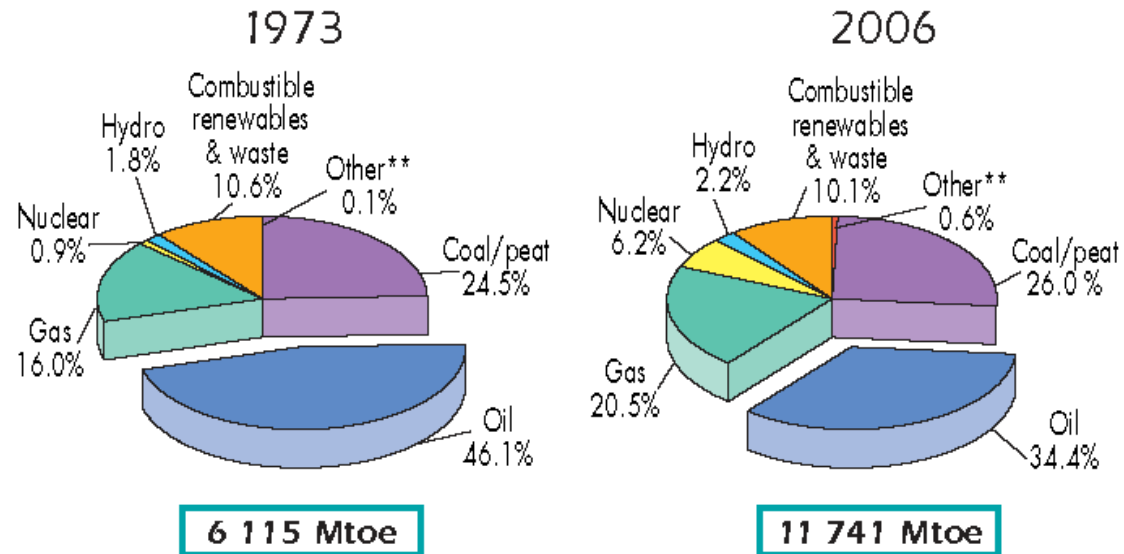
Explosion démographique - 2

En 2050, la population mondiale aura atteint 9,1 milliards de personnes, une augmentation de 2,6 milliards par rapport à la situation en 2005.

En 2050 nous aurons donc:

- 3 milliards de personnes vivant dans des régions énergétiquement affluentes.
- 3 milliards de personnes vivant dans des régions énergétiquement pauvres.
- 3 milliards de nouveaux habitants de notre planète qui vivront surtout dans des régions énergétiquement pauvres.

Energie primaire dans le monde



Source: IEA 2008

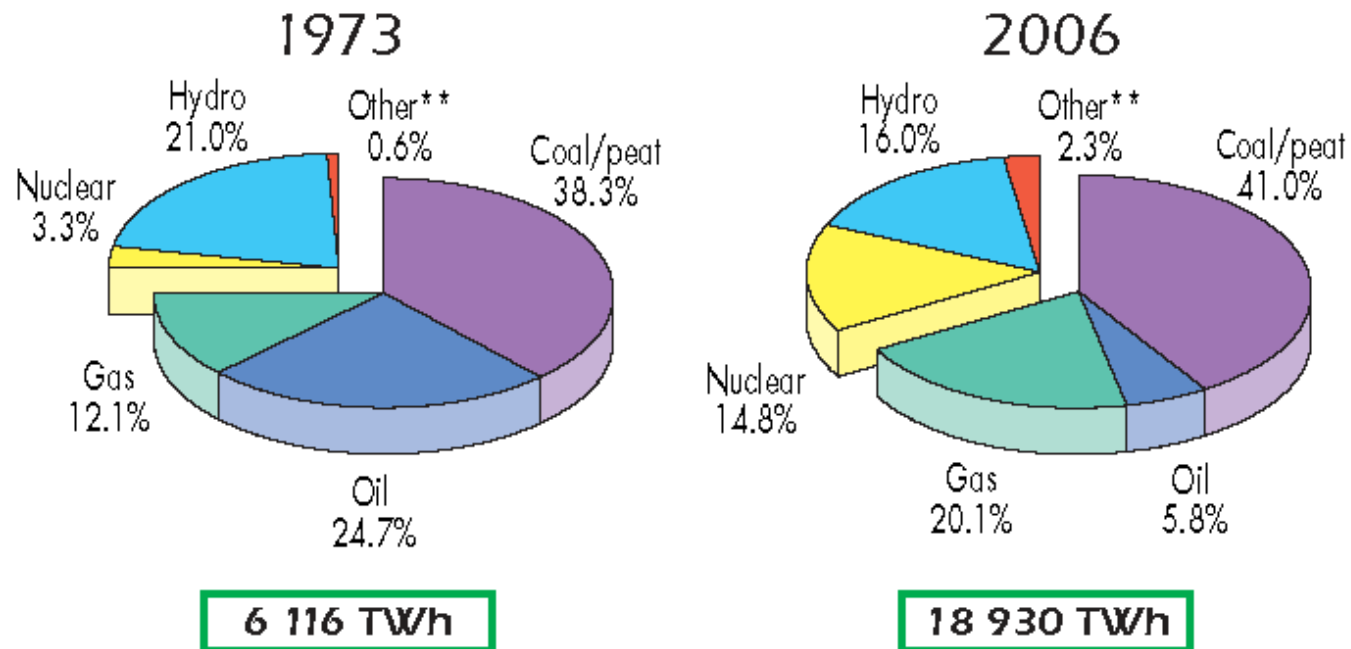
	1973	%	2006	%	croiss.
OCDE	3'747	61%	5'590	48%	149%
Hors OCDE	2'368	39%	6'151	52%	260%
	6'115		11'741		192%

*Exclude electricity trade

**Other includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

La croissance énergétique a surtout lieu hors de l'OCDE

Production d'électricité dans le monde



*Excludes pumped storage.
**Other includes geothermal, solar, wind, combustible renewables & waste, and heat.

Source: IEA 2008

Croissance en énergie primaire: 192 %

Croissance en électricité: 310 %

Le monde s'électrifie rapidement

Consommation d'énergie primaire par habitant

	2005	Croissance 1982 - 2005
Monde (référence)	1	18%
Amérique du Nord	3.9	6.4%
Ancienne URSS	2.2	-12%
Europe	2.0	14%
Moyen Orient	1.74	98%
Amérique Latine	0.7	39%
Asie & Océanie	0.6	108%
Afrique	0.2	6.6%

Emissions de gaz à effet de serre : CO₂

Suisse

Emissions CO₂ par habit. : 5.95 tonnes

Emissions CO₂ par PNB : 0.18 kg/kUS\$

France

Emissions CO₂ par habit. : 6.22 tonnes

Emissions CO₂ par PNB : 0.27 kg/kUS\$

Allemagne

Emissions CO₂ par habit. : 10.29 tonnes

Emissions CO₂ par PNB : 0.43 kg/kUS\$

Autriche

Emissions CO₂ par habit. : 9.19 tonnes

Emissions CO₂ par PNB : 0.37 kg/kUS\$

Monde

Emissions CO₂ par habit. : 4.18 tonnes

Emissions CO₂ par PNB : 0.76 kg/kUS\$

Europe 25

Emissions CO₂ par habit. : 8.46 tonnes

Emissions CO₂ par PNB : 0.44 kg/kUS\$

Amérique du Nord

Emissions CO₂ par habit. : 19.49 tonnes

Emissions CO₂ par PNB : 0.55 kg/kUS\$

Chine

Emissions CO₂ par habit. : 3.65 tonnes

Emissions CO₂ par PNB : 2.76kg/kUS\$

Source: OECD, 2006

Production et consommation en Suisse

**Production indigène d'électricité
en 2007 :
65.9 milliards de kWh - +6.1%**

Nucléaire	40.0%
Centrales à accumulation	30.1%
Centrales au fil de l'eau	25.1%
Thermiques et autres	4.8%

Constatations

La Suisse est un "très bon élève" au niveau énergétique :

- Sa production d'électricité, en Suisse, est quasi totalement hydraulique ou nucléaire.
- Elle importe pratiquement tous ces besoins en produits dont la fabrication est énergétiquement gourmande .

Quid du futur ?

La Suisse était nette importatrice d'énergie électrique en 2005 (une centrale nucléaire hors service pendant plusieurs mois) et en 2006.

Le bilan 2007 était légèrement exportateur.

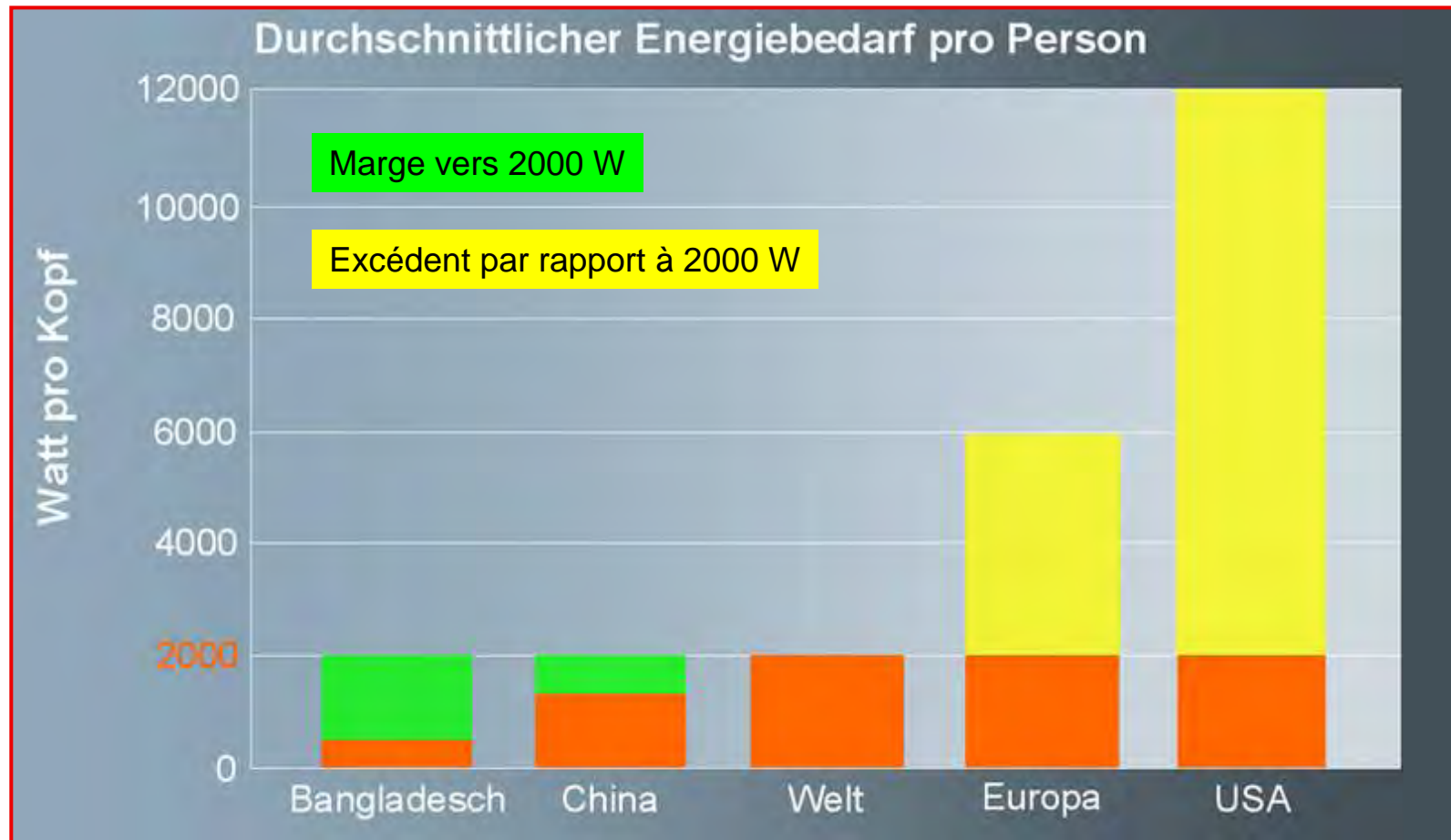
Bifurcation des défis

Sur la base des chiffres cités plus haut, il convient de distinguer les défis selon :

- Les pays industrialisés, où le défi est la consommation rationnelle - plus sobre - de l'énergie.
- Les pays en voie d'émergence, où le défi est l'augmentation massive de la production d'énergie en évitant un impact catastrophique sur l'environnement.

Sobriété énergétique

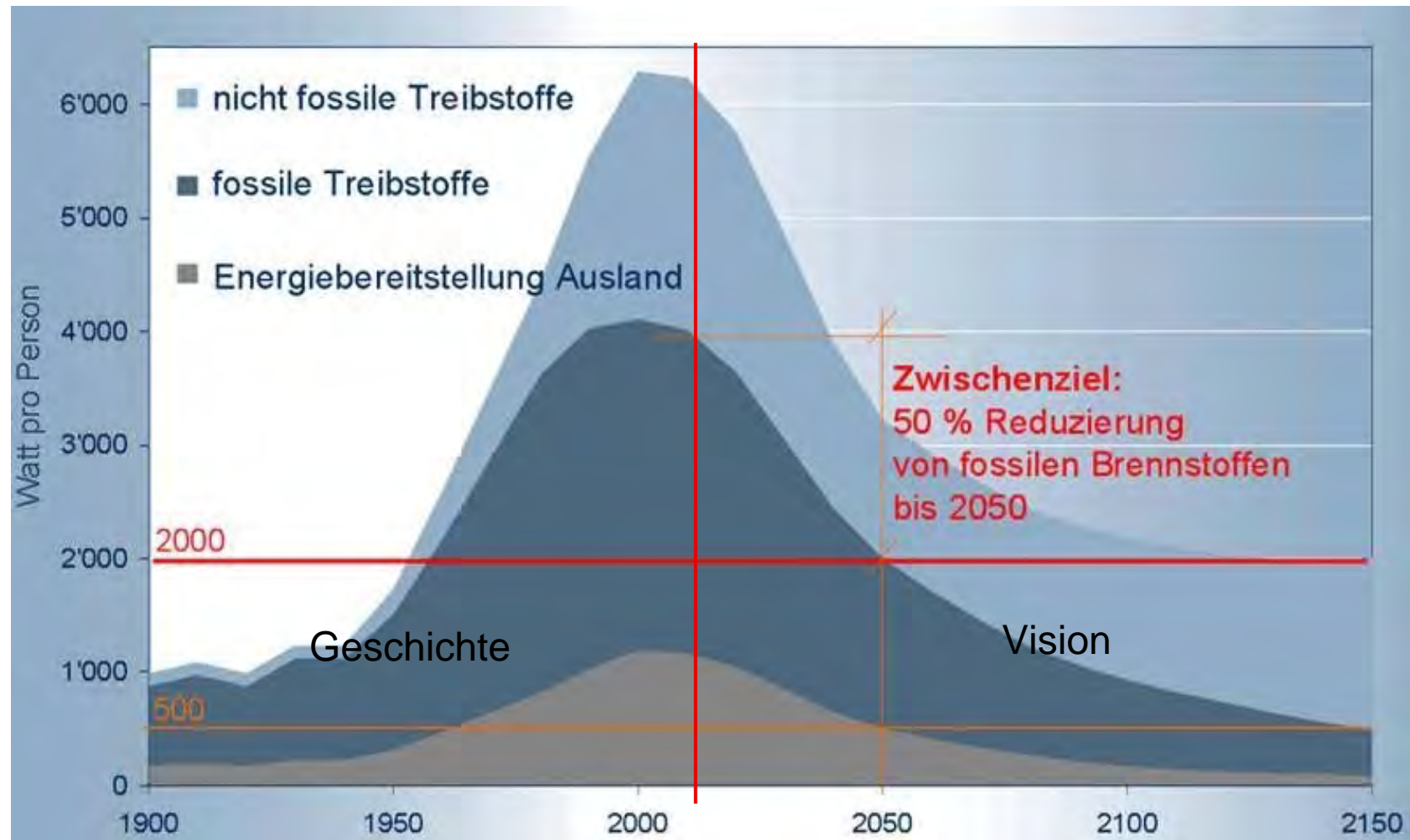
Puissance primaire mondiale : 2000 W par habitant en moyenne



Suisse : puissance primaire légèrement plus basse que celle de l'Europe

Vers une société énergétiquement sobre

Vision Suisse : La société 2000 Watt



Suisse – Objectifs

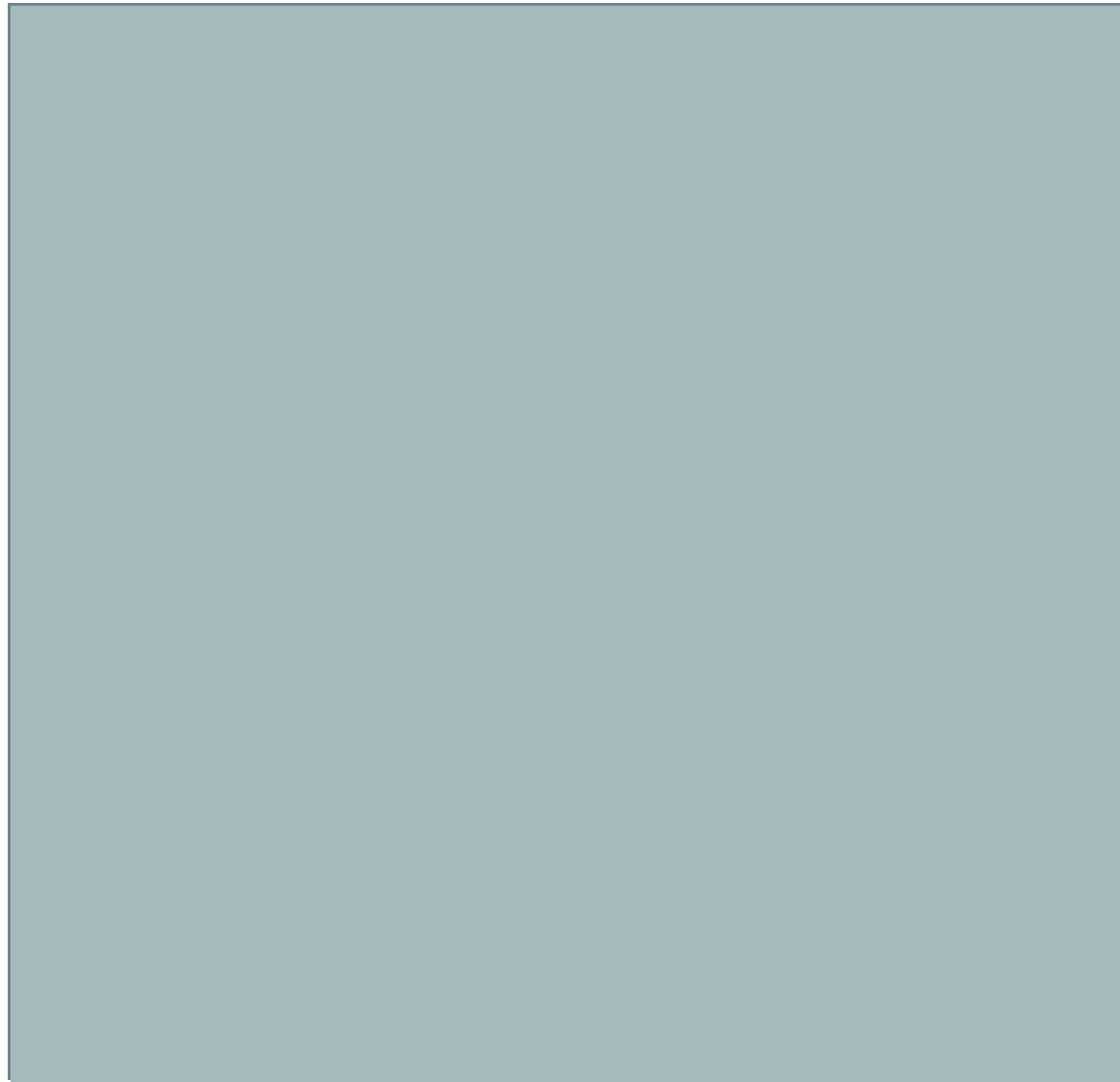
Energie

- Energie primaire
- Réduction à 50% vers 2050
- Réduction à 33% vers 2100

CO₂

- CO₂- équivalent
- Réduction à 25% vers 2050
- Réduction à 12.5% vers 2100

Consommation finale d'énergie en Suisse



Utilisation rationnelle de l'énergie – transports

Des progrès très rapides sont possibles grâce à des nouvelles technologies, tant dans le secteur public que privé.

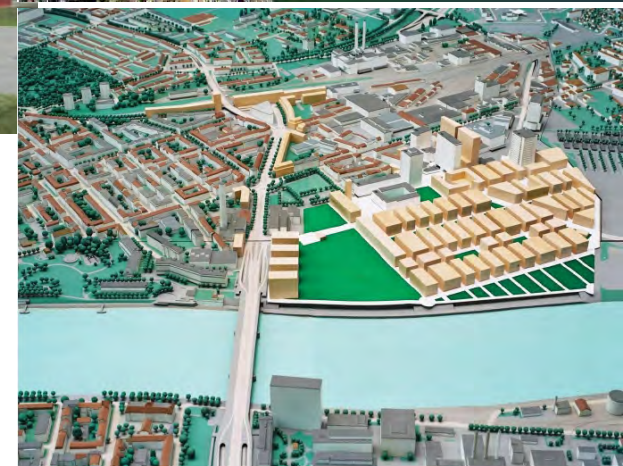


Les technologies sont là – les décisions politiques manquent.

Les véhicules hybrides rechargeables vont très vite pénétrer le marché.

Utilisation rationnelle de l'énergie – bâtiments

Nous savons déjà construire des maisons, des bâtiments et même des quartiers intelligents.

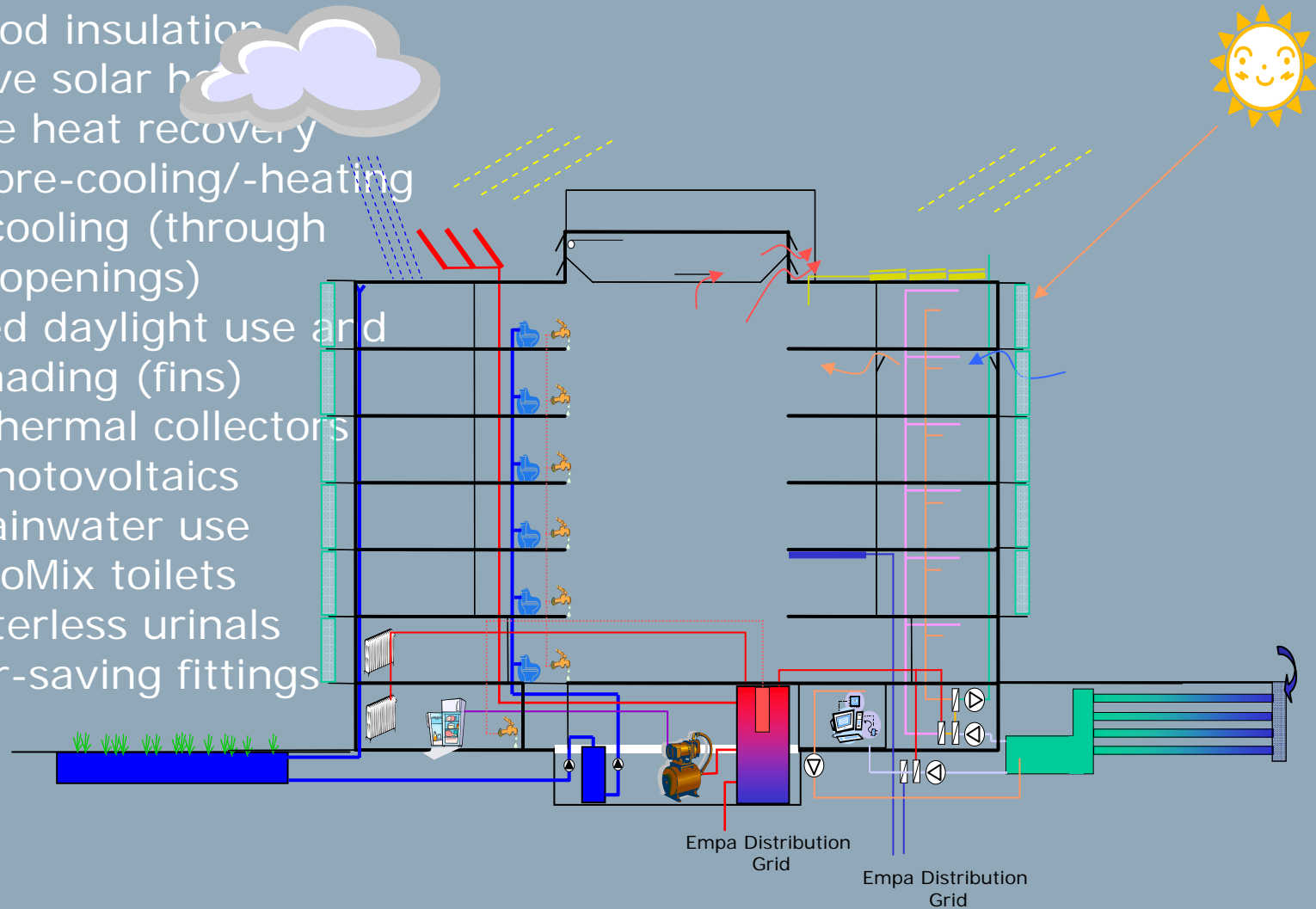


Opportunités à court terme :

- **Rénovations**
- **Les pompes à chaleur**

Forum Chriesbach, Concept

- Good insulation
- Passive solar heating
- Waste heat recovery
- Earth/air pre-cooling/-heating
- Free cooling (through openings)
- Optimized daylight use and shading (fins)
- Solar thermal collectors
 - Photovoltaics
 - Rainwater use
 - NoMix toilets
 - Waterless urinals
- Water-saving fittings



Example: Forum Chriesbach, Duebendorf



Géothermie pour chauffage et refroidissement

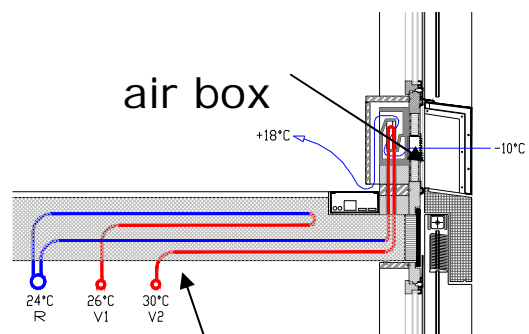


Chauffage

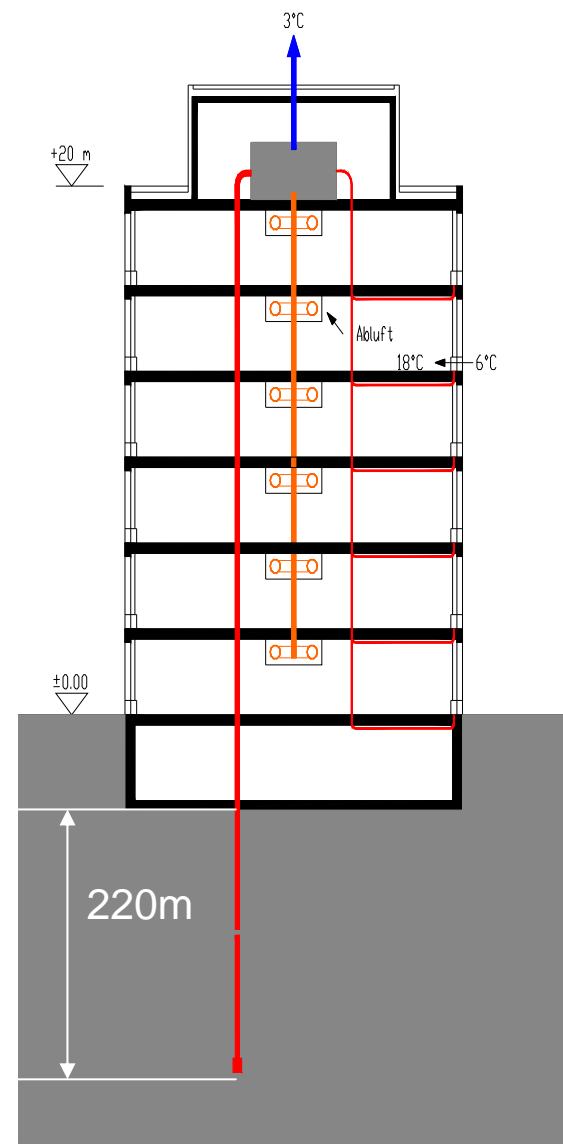
Pompe à chaleur avec 10 sondes à 220m de profondeur et recyclage de l'air usée

Refroidissement

avec l'eau de la nappe fréatique



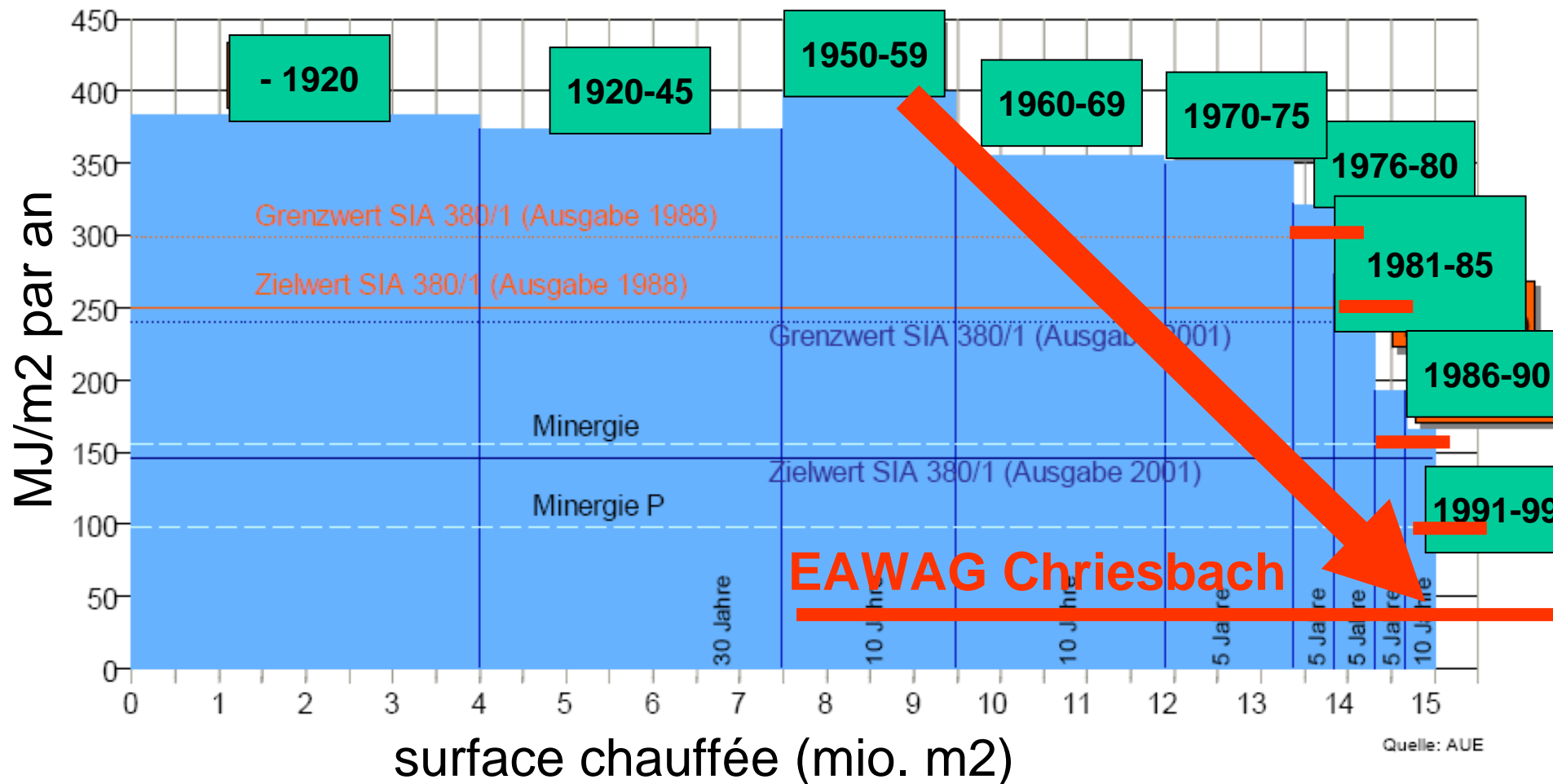
chauffage/refroidissement dans les dalles



Développement durable: moteur de l'innovation



consommation d'énergie (chauffage)
de 400 à 40 MJ/m².a

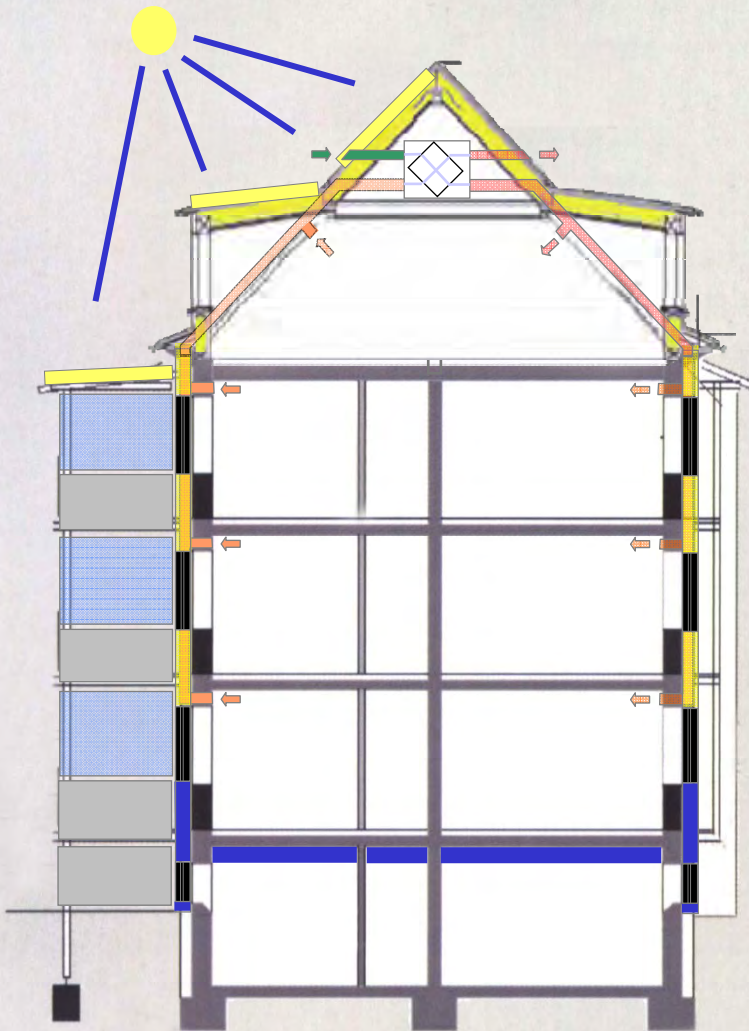


CCEM: Renovation with modular Elements and guaranteed Quality

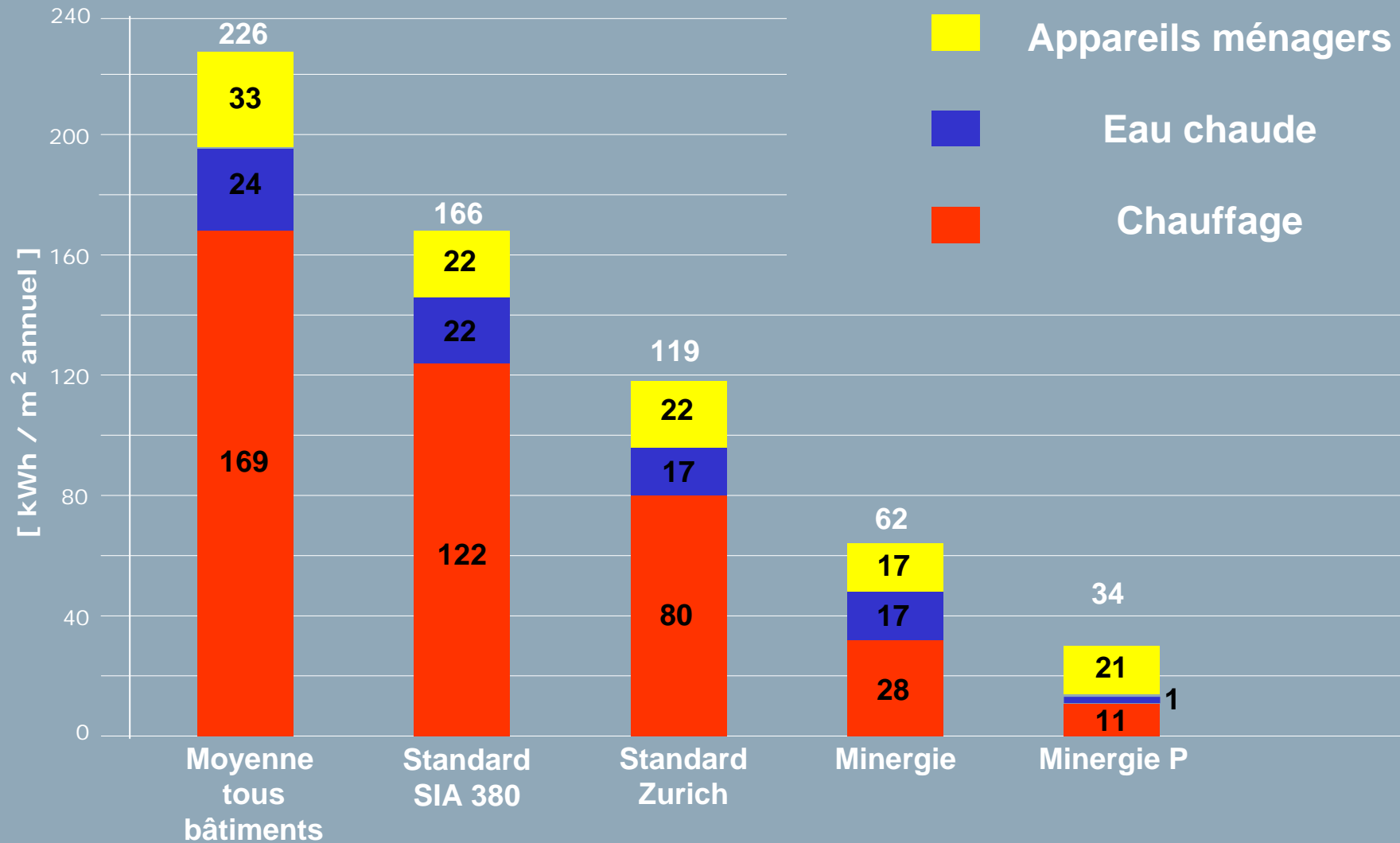
good technology

CCEM Project:

- integrated building design
- technical perfection with prefab elements
- general contracting for better coordination of modules and quality control
- more efficient planning and production process



Efficacité énergétique bâtiments: Facteur 10



La société à 2 000 Watt voudrait dire

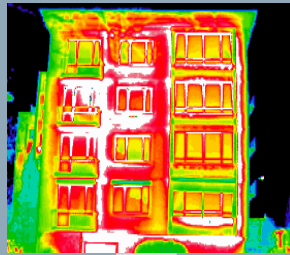


Voitures
10 litres/100km
(essence & diesel)



Véhicules légers
3 litres/100km
(multi-carburants)

Bâtiments
10 litres
combustible /m²



Minergie P
3 litres de
combustible/m²

Sources fossiles
Pétrole, gaz,
charbon



Renouvelables

Détritus
350
kg/an/personne



**Maériaux en
circuit fermé**
150kg/
an/personne

2005

2050

LESO-PB R&D PRIORITIES

**RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES
INTEGRATION**

**ADVANCED
DAYLIGHTING
TECHNOLOGIES**



**NANOSOLAR
TECHNOLOGIES**

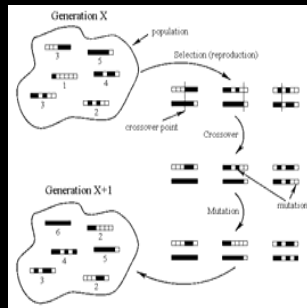
**BIOMIMETIC
BUILDING
TECHNOLOGIES**

**COMPLEX
SYSTEMS**

**SUSTAINABLE URBAN
DEVELOPMENT**

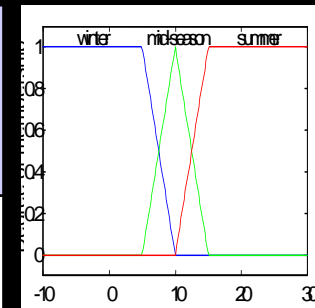
BIOMIMETIC BUILDING TECHNOLOGIES

USER ADAPTIVE BUILDING CONTROL



Genetic Algorithms

Controller	Energy Savings	Thermal Comfort	Visual Comfort	Rejection (after 4 Weeks)
Manual	0 %	84 %	86 %	-
Non- users adaptive	<u>25 %</u>	84 %	88 %	<u>25 %</u>
Users adaptive	<u>24 %</u>	86 %	89 %	<u>5 %</u>

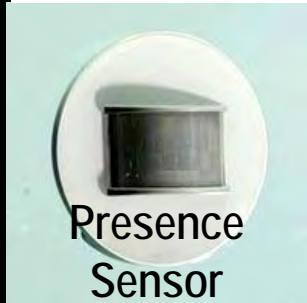


Fuzzy Logic

Artificial Neural Networks (ANN)

BIOMIMETIC BUILDING TECHNOLOGIES

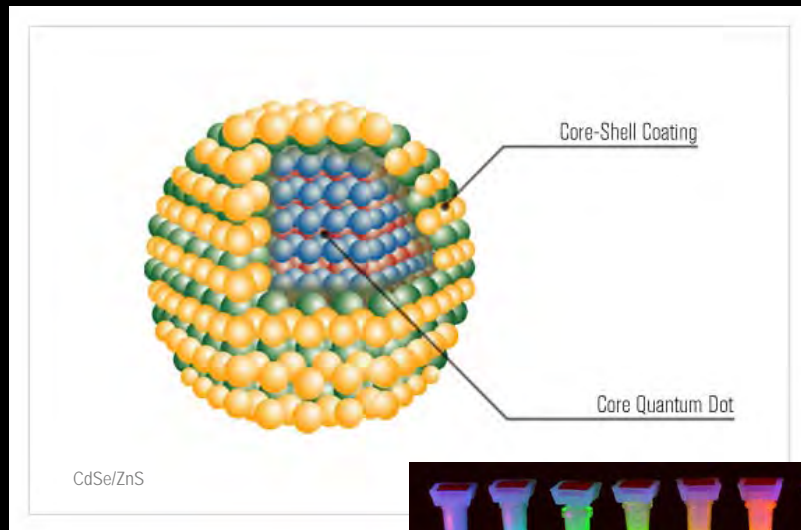
BEMS WIRELESS TECHNOLOGY



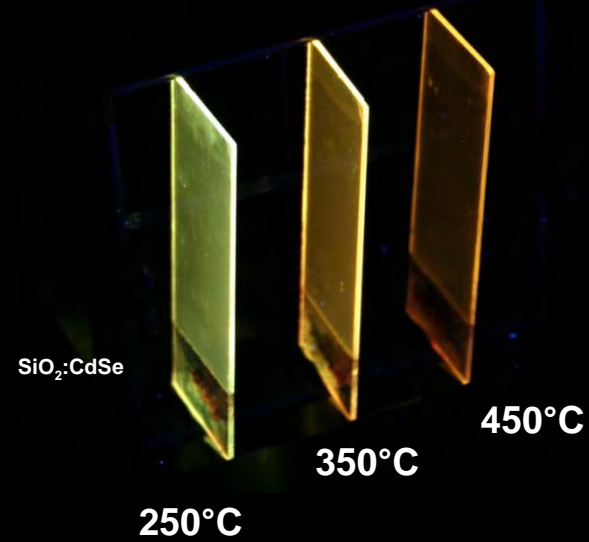
<http://www.adhoco.com/>

NANOSOLAR TECHNOLOGIES

QUANTUM DOTS PHOTOLUMINESCENCE

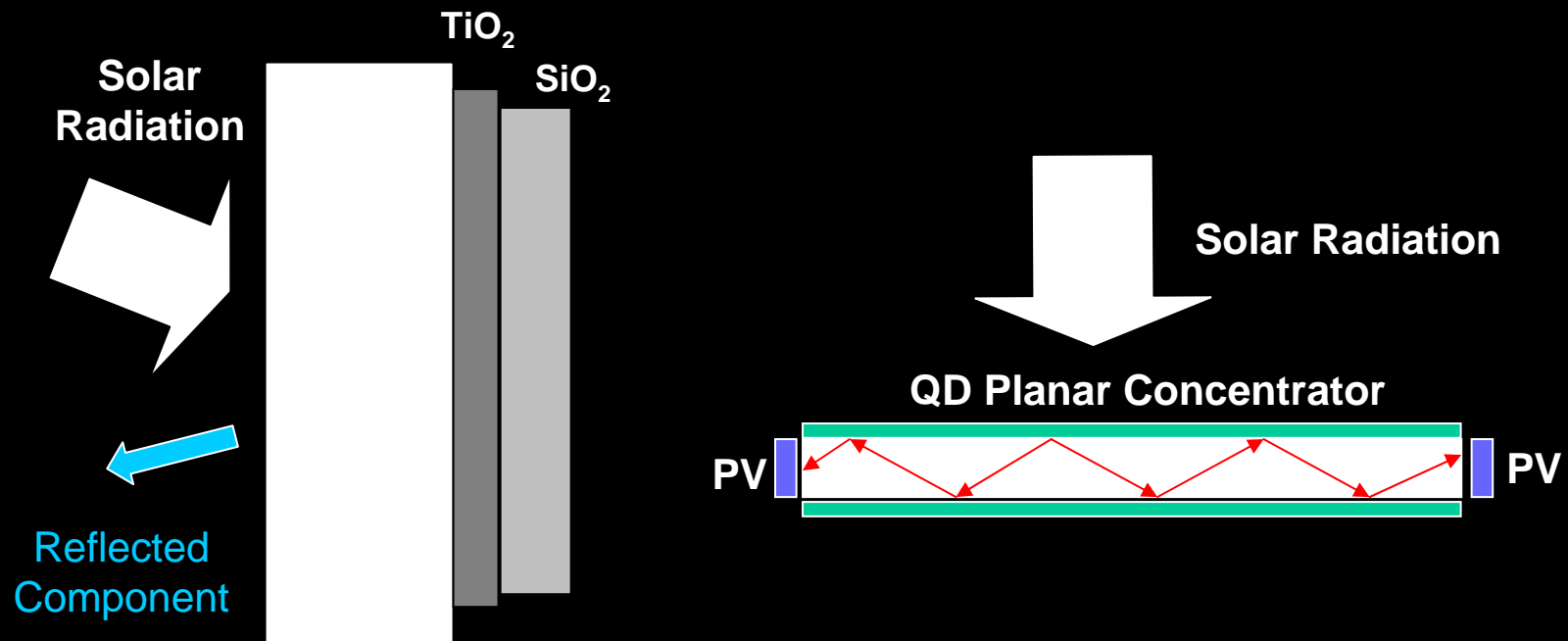


Annealing Temperatures



NANOSOLAR TECHNOLOGIES

NANOSTRUCTURED THIN FILMS & MATERIALS



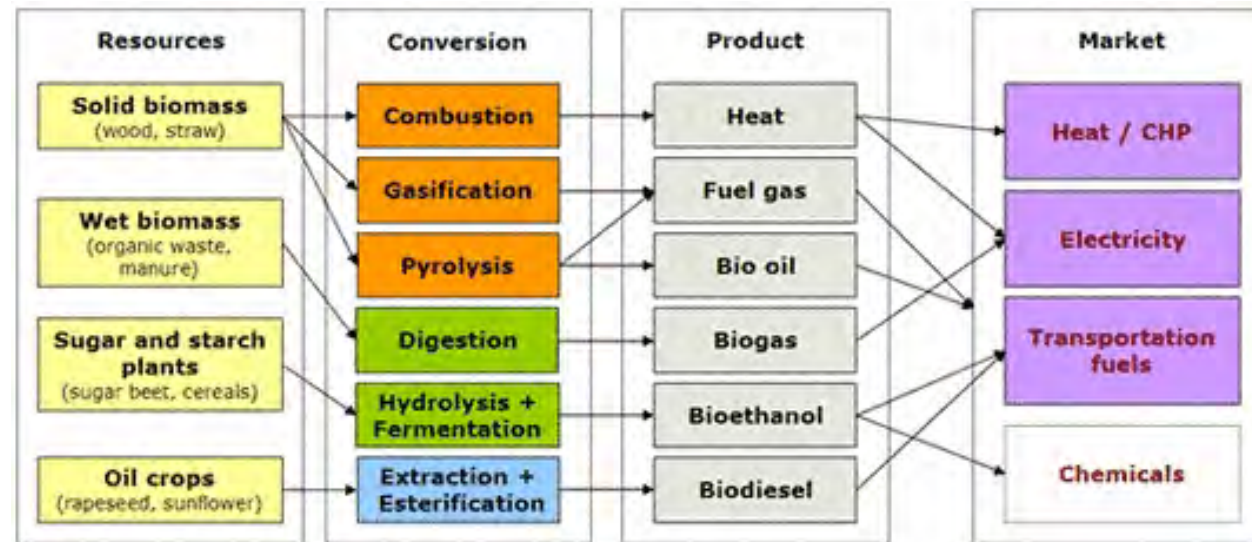
REN TECHNOLOGIES INTEGRATION



**BUILDING
INTEGRATION
OF SOLAR
THERMAL
COLLECTORS**

Utilisation rationnelle de l'énergie – biocarburants

Les biocarburants jouent un rôle de plus en plus important dans les transports.



Un effort vers un système de labélisation multicritères et adoptable tant par les pays consommateurs que producteurs est crucial.

Un conflit entre la production de nourriture et d'énergie doit être évité.

Opportunité pour la Suisse : biocarburants et technologies de "seconde génération" → produits cellulosiques.

The Roundtable on Sustainable Biofuels

Pour que les biocarburants réalisent leur potentiel



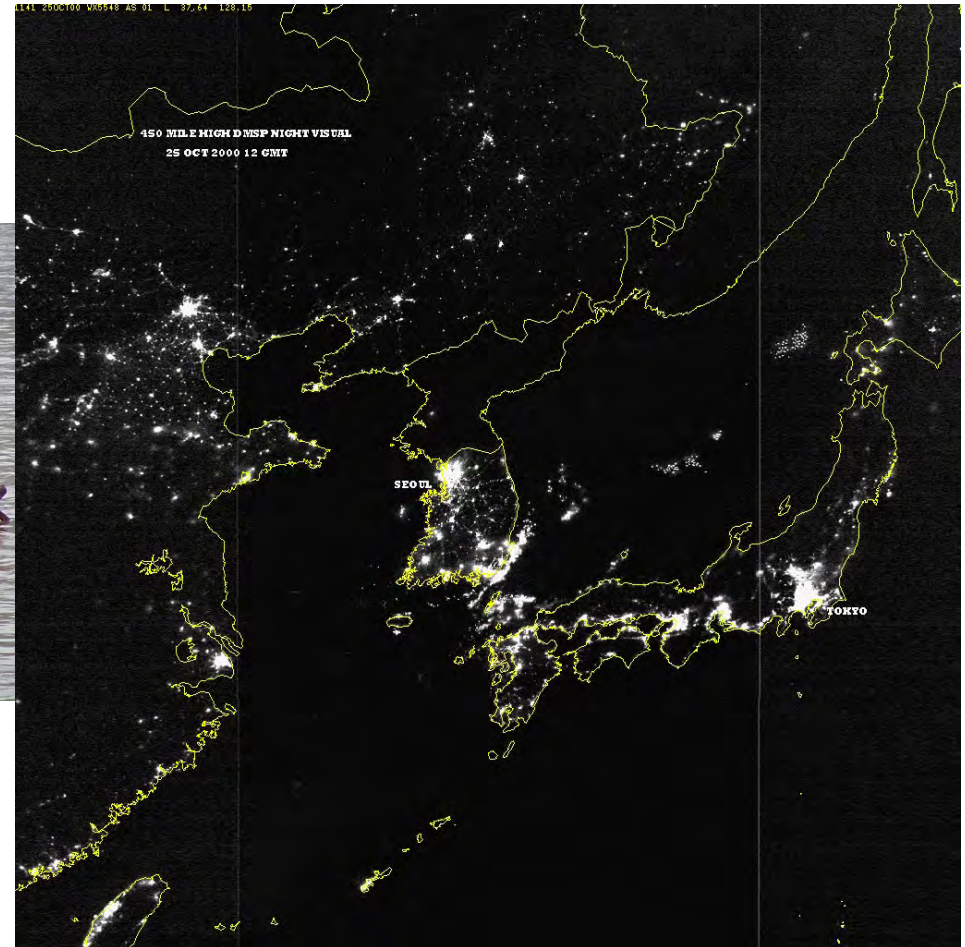
Production d'énergie

Production d'énergie

Il n'est pas réaliste de demander aux régions en voie d'émergence de réduire leurs demandes d'énergie supplémentaire.



Production d'énergie



Le déficit énergétique de la Chine, l'Inde et l'Afrique

Alors que le moyenne mondiale de consommation d'énergie primaire est de 2 000 W, elle est de 900 W en Chine, Inde et Afrique pris ensemble.

Pour remédier à cette situation, il faudrait construire plus de 3 000 centrales nucléaires de 1 300 MW chacune.

La Chine a déjà lancé un programme pour mettre en ligne environ 60 000 MW de nouvelle production électrique par an et le fera pendant au moins dix ans.

Les carburants fossiles - (1)

Charbon

- Les réserves de charbon aux USA, en Chine, en Inde, en Russie et en Afrique du Sud peuvent assurer leurs approvisionnements énergétiques pour plusieurs siècles.
- Nous savons construire des centrales au charbon ayant de très bons rendements et ayant un impact sur l'environnement acceptable. Toutefois, ces technologies sont onéreuses à mettre en œuvre, tant au niveau investissement que fonctionnement.

Pétrole

- L'utilisation du pétrole pour des raisons hors transport et industries chimiques est en forte diminution.
- La production en Mer du Nord par les puits encore en exploitation diminue déjà. La production en Alaska a atteint un plateau.
- Sources non-conventionnelles : sables bitumeux, oil shale, etc. + off-shore ultra-profond

Gaz naturel

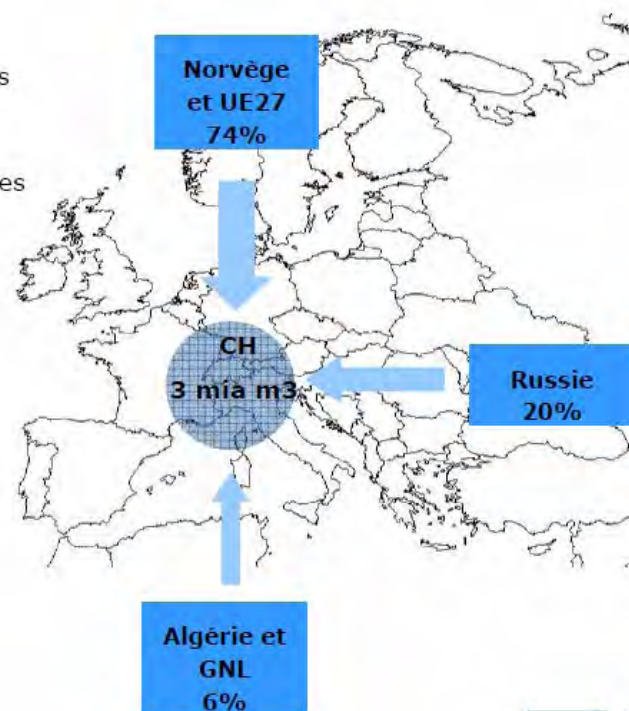
- En nombre d'années, les réserves de gaz naturel sont assez similaires à celles du pétrole.
- Le premier pays exportateur est la Russie et le deuxième le Canada (2^{ème} prod. : USA).
- La poursuite de la politique des gaziers suisses d'une large répartition des sources d'approvisionnement est donc souhaitable et doit être soutenue.
- Le transport et distribution sont difficiles. **Le GNL va jouer un rôle croissant.**



Sources d'approvisionnement principales de la Suisse

Approvisionnement de la Suisse

- La production européenne diminuera avec le temps
- Il y a suffisamment de gaz disponible dans les pays proches
- Plus de 50% des réserves mondiales sont à des distances économiques
- Le GNL permettra de raccorder des ressources plus éloignées



Les carburants fossiles - le charbon

Il paraît inévitable que :

Le 21^{ème} siècle sera celui du charbon.

Les trois questions sont dès lors :

- Saurons-nous nous assurer que les meilleures technologies seront mises en œuvre dans le monde entier ?
- Avec quelle rapidité saurons-nous faire la transition vers d'autres sources ?
- Quelles autres sources d'énergie pourrions-nous déployer pendant la transition vers une source abondante et fiable ?

Le monde industriel devra probablement co-investir dans les technologies propres avec les pays émergents.

Nucléaire

- 438 centrales industrielles sont en fonctionnement dans 38 pays (2007).
 - 130 dans l'Europe de l'Ouest – 59 en France, 5 en Suisse et 10 en Suède
 - 128 aux Amériques – 104 aux Etats-Unis
 - Capacité moyenne d'utilisation par rapport à la puissance électrique installée :
89,9% (Etats-Unis, 2006), 92 % (Suisse, 2006)
 - 106 en Asie – 55 au Japon, 17 en Inde
 - 67 dans l'ancienne USSR et l'Europe de l'Est
 - 2 en Afrique
- Près de 100 centrales sont en phase de planification ou de construction dans le Monde, notamment en Chine, en Inde, au Brésil, aux USA et en Finlande.
- 16% de la production d'électricité dans le Monde (2006)
 - 78% en France
 - 40% en Suisse
 - 32% en Allemagne
 - 19% aux Etats-Unis
 - Moins de 5% en Chine

Source : WNA, DOE, 2007

Nucléaire suisse: les perspectives

Constat :

➤ Beznau I et II ⁽¹⁾	1969 – 1971	730 MW	6.0 TWh/an
➤ Mühleberg	1972	355 MW	2.9 TWh/an
➤ Gösgen ⁽¹⁾	1979	970 MW	8.1 TWh/an
➤ Leibstadt	1984	1'165 MW	9.4 TWh/an

⁽¹⁾ Co-production de chaleur à distance

Facteur de capacité pour les cinq centrales en 2006 : 93.7%

-> meilleure performance mondiale.

Beznau I & II et Mühleberg : 1'085 MW – retirées vers 2020-2025.

Gösgen et Leibstadt : 2'135 MW – retirées entre 2030 et 2040

Quelques centrales au gaz semblent inévitables à court terme.

Hydraulique

- La poursuite de grands projets hydrauliques dans les pays en émergence (Chine, Amérique Latine, Afrique du Sud-Ouest, etc.) est inévitable et probablement souhaitable.
- Il nous appartient de mieux comprendre les interactions climatiques entre ces énormes installations.
- En jouant la carte pompage-turbinage, la Suisse peut devenir le poumon de l'Europe énergétique et monnayer ces services au prix fort.
- La reconfiguration de certains barrages existants doit être encouragée.
- La Suisse possède un fort potentiel dans les domaines de la micro- et mini-hydraulique.



Sources alternatives - photovoltaïque

- Capacité mondiale: 3'700 MW (2005), projeté à 7'000 MW en 2007
 - Japon : 1'420 MW
 - Allemagne : 1'420 MW
 - Etats-Unis : 480 MW
 - Suisse : 26 MW
- Source : IEA Photovoltaic Power Systems Programme
- Facteur d'utilisation moyenne par rapport à la puissance installée : 17% (Etats-Unis), 9.2% (Suisse)



Photovoltaïque: à multiplier pour la Suisse

L'exemple de la centrale photovoltaïque du Stade de Suisse BKW - FMB

Surface installée : 12'000 m²

Puissance installée : 1'300 kW

Energie annuelle produite (moyenne) : 1'200 MWh

Remplacement Beznau I & II et Mühleberg :

- Puissance : 835 Stades de Suisse
- Energie : 7'350 Stades de Suisse

**II FAUT faciliter la construction
de telles réalisations exemplaires.**



Sources alternatives - éoliennes

Pénétration du marché très rapide
(+2'500 MW aux USA en 2006 ...).

74'000 MW installés au niveau mondial
en 2006 :

20'600 MW en Allemagne
11'600 MW en Espagne
11'600 MW aux Etats-Unis
12 MW en Suisse



Source : GWEC, 2007

- De grands fabricants tels que General Electric et Siemens sont très présents – une société indienne tient le 4^{ème} rang.
- Facteur d'utilisation moyenne par rapport à la puissance installée : 27% (Etats-Unis), 14.5% (Suisse)

Energie éolienne en Suisse

L'exemple du parc éolien de Mont-Crosin BKW - FMB

Nombre d'éoliennes : 9 (600 kW – 1'750 kW)

Puissance installée : 7'660 kW

Energie produite annuelle (moyenne) : 9'176 MWh

Remplacement Beznau I & II et Mühleberg :

- Puissance : 140 Mont-Crosins
- Energie : 960 Mont-Crosins

**II FAUT faciliter la construction
de telles réalisations exemplaires.**



Sources alternatives Photovoltaïque et Eoliennes

- Le photovoltaïque et l'éolien ne déplacent que l'énergie produite par d'autres sources **pas** le besoin d'autres capacités de production.

Le potentiel suisse, quoique faible, doit être développé.

Une forte pénétration du photovoltaïque et l'éolien n'est concevable que par le biais d'un fort développement du stockage d'énergie, par voie hydraulique, chimique ou électrique.

Le futur énergétique sera électrique

Les énergie renouvelables passent pratiquement toutes par le vecteur électrique:

- Hydraulique
- Eolien
- Photovoltaïque
- Géothermique
- Océans
- Fusion

Une utilisation plus sobre de l'énergie entrainera une plus forte pénétration de l'électricité :

- Transports publics
- Voitures électriques et hybrides rechargeables
- Pompes à chaleur dans les bâtiments
- Vitesse variable dans l'industrie

Politique énergétique Conseil Fédéral - 1

21 février 2007 – Quatre piliers

Efficacité énergétique

Energies renouvelables

Hydraulique: source principale d'énergie renouvelable

Diversification des sources renouvelables

Centrales électriques

Centrales à gaz cycle combiné – stratégie de transition -
compensation à 100% du CO₂

Continuer de miser sur les centrales nucléaires - nécessité de
remplacer les centrales existantes ou construire des nouvelles

Politique énergétique étrangère

Collaboration et commerce

Politique énergétique Conseil Fédéral - 2

La politique énergétique promulguée est prudente pour autant que les quatre piliers soient mis en œuvre d'une manière volontariste.

La Suisse peut et doit servir d'exemple au niveau de la sobriété énergétique à tous les niveaux.

Il est important que la Suisse maintienne l'autonomie de son approvisionnement électrique.

Il n'est pas certain que les pays voisins continuent de vouloir accueillir des nouvelles centrales au charbon ou au gaz dont le but principal serait l'exportation d'énergie électrique vers la Suisse.

Une augmentation du commerce d'énergie électrique implique un renforcement des infrastructures de transport ce qui demeure problématique au niveau de l'opinion publique.

Les décisions politiques doivent s'inscrire dans la durée.

Energy Center : Impact on municipalities

Consortium PLUS-e

Putting together the actors in the field of urban energy planning

- Municipalities, in particular through their utilities services
- Energy companies
- Engineering consulting companies
- Cantonal and municipal energy agencies
- Builders and developers
- Financial institutions
- Swiss Federal Office of Energy
- Other public agencies dealing with urban development
- Foundations

Novatlantis – 2000 Watt society

- Energy Center is the first academic member
- The Energy Center is positioned to become Novatlantis Romandie

Plusieurs technologies requises pour avoir un impact important à court terme sont disponibles.

Commençons à les utiliser

Il faut nous mettre d'accord quant à un programme à court, moyen et long terme dans la recherche.

Commençons à investir massivement dans la recherche et le développement.

Si pas maintenant – quand ?

Si pas nous – qui ?

Si pas ici – où ?

Yes we can!

Président Barak Obama

Les grands défis énergétiques du 21^{ème} siècle

Economies d'énergie dans les bâtiments

Hans Björn (Teddy) Püttgen

Professeur, Chaire de Gestion des Systèmes Energétiques

Directeur, Energy Center

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Georgia Power Professor Emeritus, Georgia Institute of Technology

Banque Cantonale Vaudoise

Lausanne

4 mars 2009