

L'énergie dans tous ses états

Prof Daniel Favrat

**Directeur de l'
Institut des Sciences de l'Energie (ISE), EPFL**

Contenu

- Préambule (importance des sciences thermiques en énergétique)
- Avoir les idées claires: concept d'exergie
- Les techniques de génération d'électricité et de cogénération (électricité, chaleur, év. Froid)
- Deux exemples de recherche: moteur à gaz, pile à combustible SOFC
- Les technologies intégrées (cogénération + pompe à chaleur)
- L'optimisation environnometrique (én(x)ergétique, économique, environnementale)

Réorganisation de l'EPFL

Faculté des Sciences et Techniques de l'Ingénieur (STI)

Faculté
des
Sciences
de Base

Physique
Mathématique
Chimie

Génie
mécanique

Elec-
tricité

Micro-
mécanique

Matériaux

Conception et production

Automatique

Thermique

Méc.Fluide

Mach. Electr.
Electronique de
puissance,
Réseaux

Institut
des
Sciences
de
l'Energie

*1 parmi les
9 instituts
de la STI*

Faculté de
l'Environnement
Natural,
Architectural et
Construit

Génie Civil

Génie Rural

Architecture

Faculté des
Sciences de
l'Information

Informatique

Informatique
et com-
munications

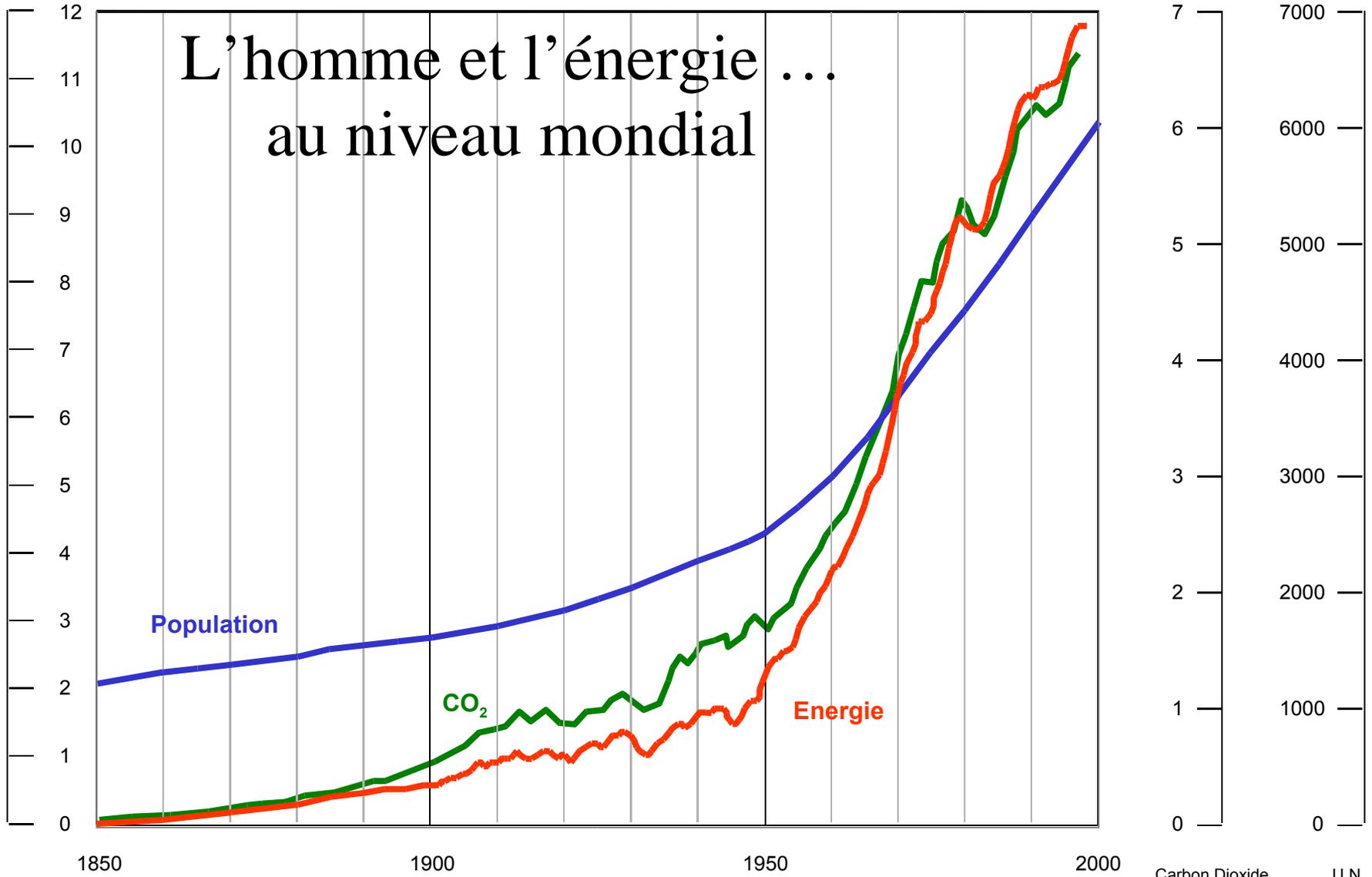
Nouvelle Faculté des Sciences de la Vie

L'homme et l'énergie ... au niveau mondial

Cons. énergie
[TW.an]

Emissions de
CO₂ [GT C]

Population
mondiale
[Mhab]



ENERDATA, IEPE
(Martin & Romain)

Carbon Dioxide
Information Analysis
Center
U.N.
Population
Division

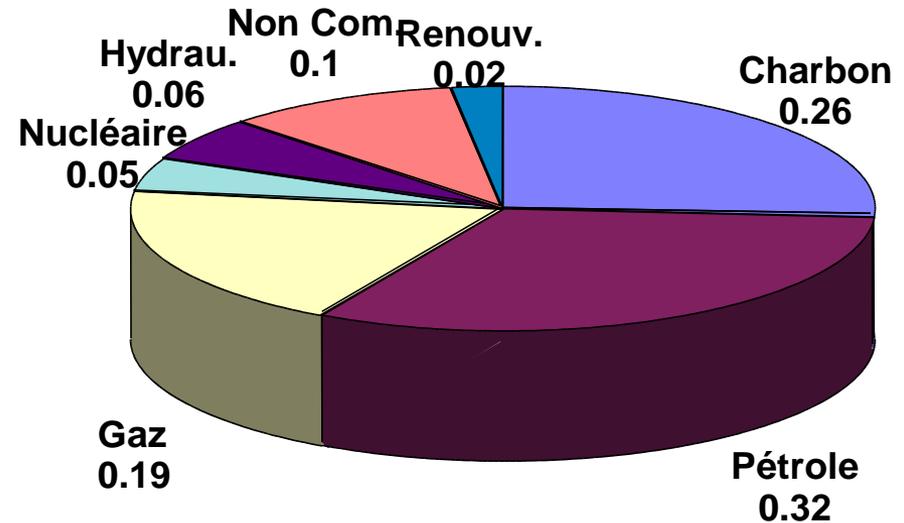
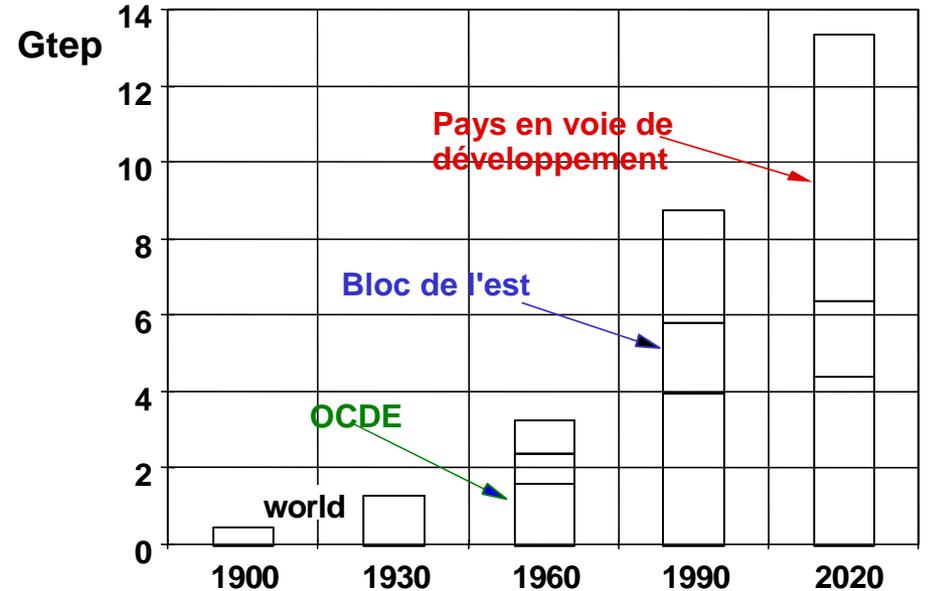
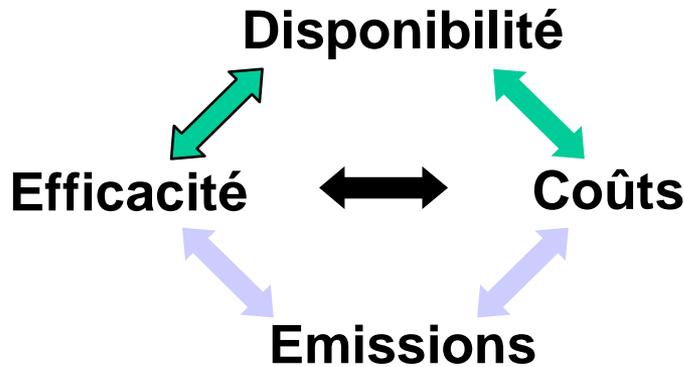
<http://cdiac.esd.ornl.gov/>

Document Haldi (Lasen)



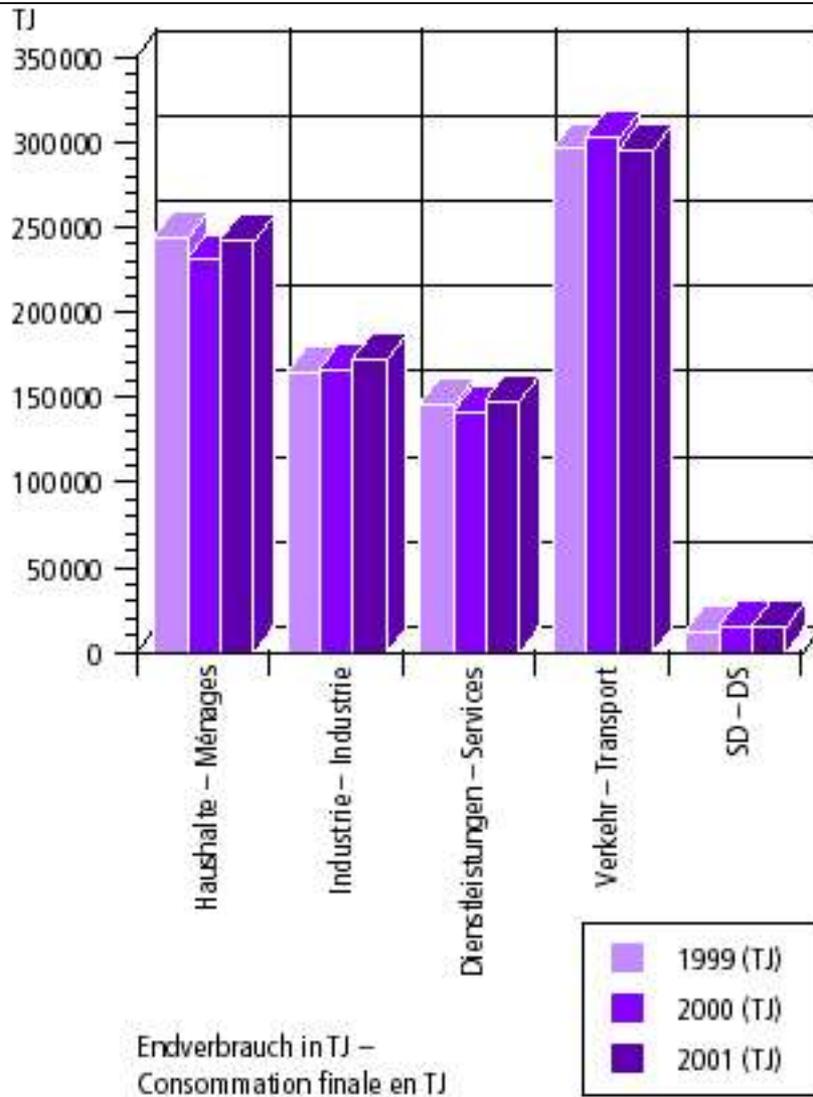
Tendances

- Augmentation significative de la consommation d'énergie (surtout dans les pays en développement)
- Défis environnementaux
- Procédés thermiques de conversion $> 90\%$, et importante source de polluants et d'inefficacité

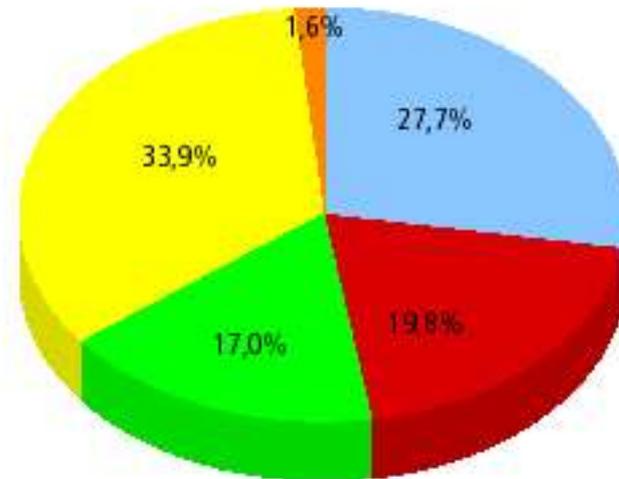


Source AIE

Répartition de la consommation finale Suisse



Anteil 2001 der vier Sektoren in %
Parts en 2001 des quatre secteurs en %

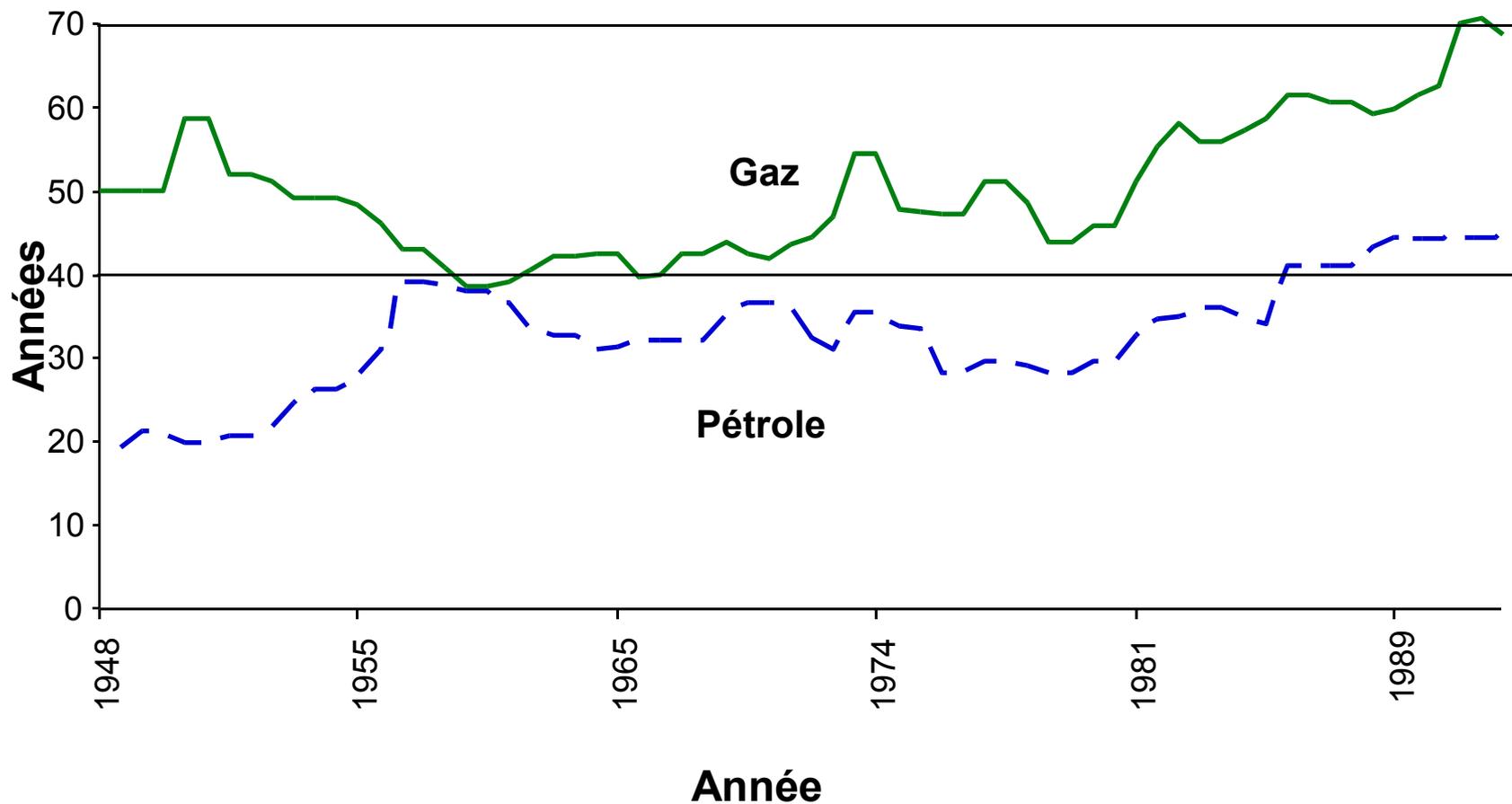


- Haushalte – Ménages
- Industrie – Industrie
- Dienstleistungen – Services
- Verkehr – Transport
- SD – DS

SD Statistische Differenz inklusive Landwirtschaft
DS Différence statistique y compris l'agriculture

Fig. 3 Aufteilung des Endverbrauchs nach Verbrauchergruppen
Répartition de la consommation finale selon les groupes de consommateurs

Evolution de la consommation par rapport aux réserves prouvées

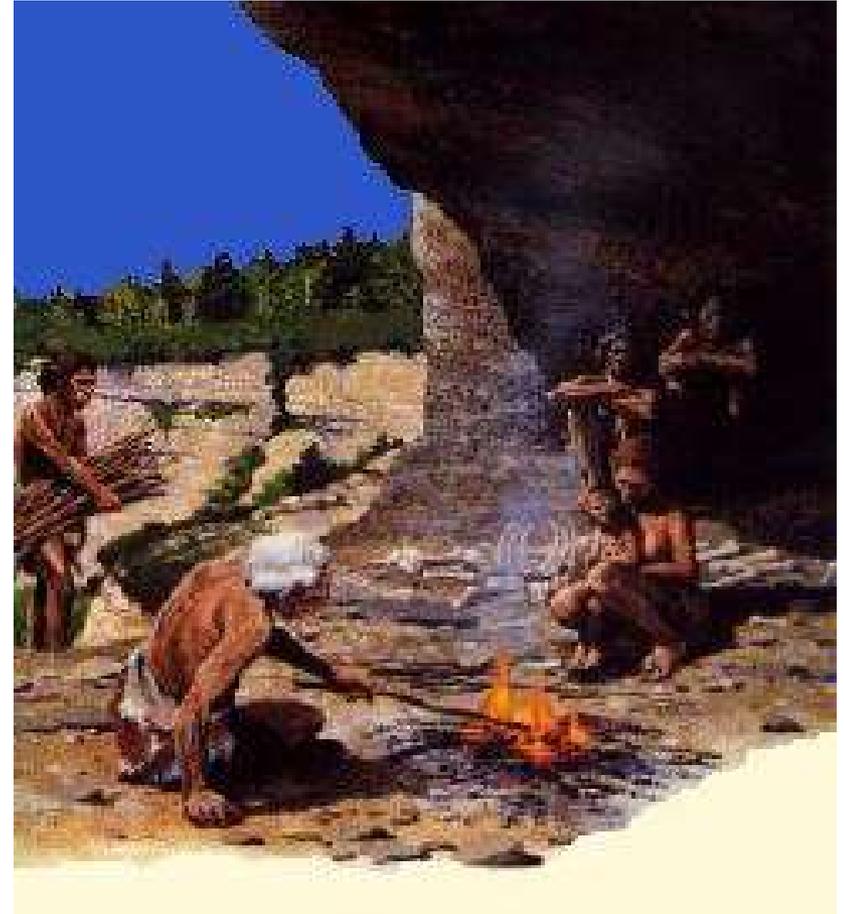


Source: IIASA 95

Historique 1: combustion et chauffage

**Simple combustion pour du chauffage
(depuis environ 400000 ans)**

**Aujourd'hui encore la majorité des
systèmes de chauffage (simple chaudière
au mazout, au gaz, etc.)**



**Efficacité (rendement énergétique au sens du premier principe) dans les
chaudières actuelles) = env 92% du pouvoir calorifique inférieur**

Rendement exergétique= env 16% (pour une température moyenne de 60°C)

Historique 2 : combustion et travail (ou électricité)

Entropie et
2ème principe

Rendement exergetique
(moteur simple)

$$\eta = \frac{\dot{E}}{\dot{E}_q} = \frac{\dot{E}}{\dot{Q} \left(1 - \frac{T_a}{T}\right)} = \frac{\varepsilon}{\left(1 - \frac{T_a}{T}\right)}$$

$$dS \geq \frac{\delta Q^+}{T}$$

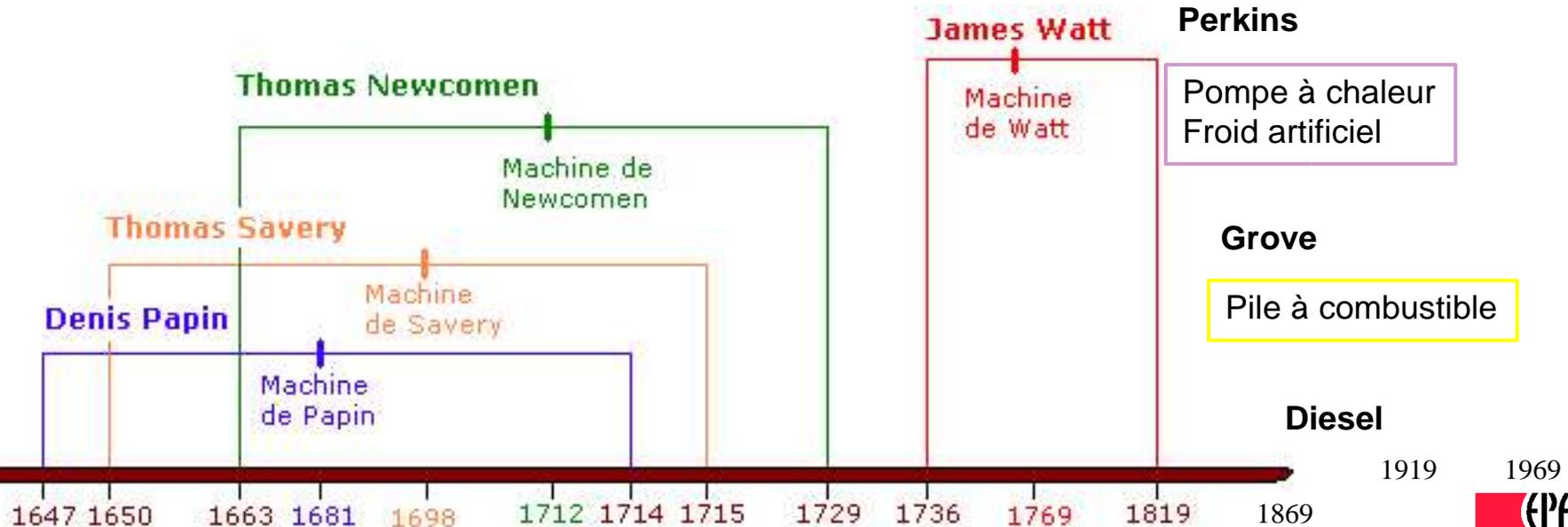
Efficacité ou
Rendement 1er principe
(moteur simple)

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}}{\dot{Q}} = 1 - \frac{T_{froid}}{T_{chau}}$$

Gouy (bases)

Clausius

Carnot



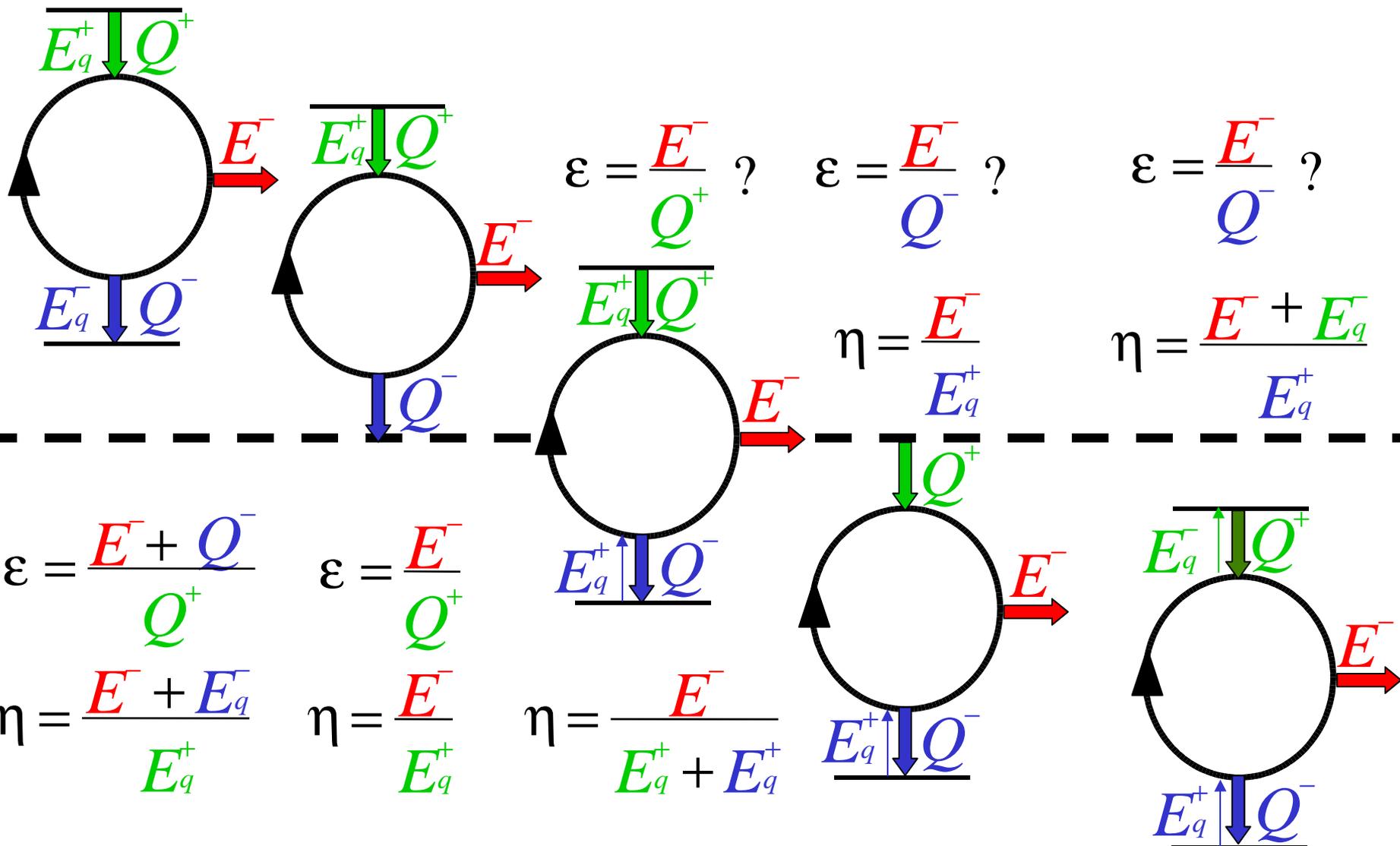
Exergie

L'**exergie** associée à un transfert ou à un stock d'énergie est définie comme le **potentiel travail maximal** qu'il serait idéalement possible de tirer de chaque unité énergétique transférée ou stockée (à l'aide de cycles réversibles utilisant l'atmosphère comme une des deux sources - froide ou chaude).

L'approche exergétique permet de **quantifier** de façon cohérente à la fois la **quantité et la qualité** des différentes formes d'énergie mises en jeu.

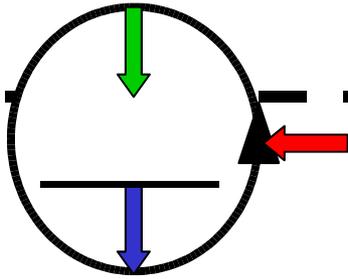
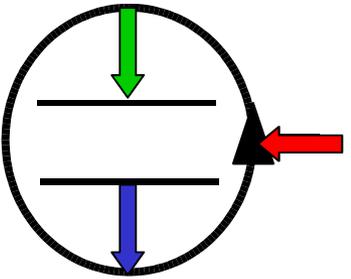
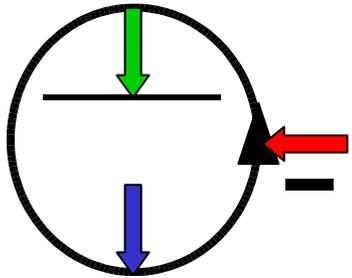
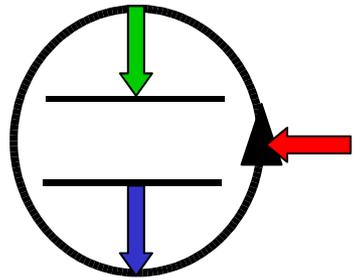
L'exergie présente le grand avantage de pouvoir définir des rendements qui sont adaptables à toutes les situations (couplage chaleur-force, trigénération, réfrigération, pompe à chaleur, etc.) et pour tous les domaines d'utilisation de l'énergie. Ces **rendements, qui sont toujours inférieurs à 100%**, donnent une appréciation de la qualité relative de différents concepts techniques.

Famille de cycles bithermes moteurs



Famille de cycles bithermes de pompe à chaleur (au sens large)

$$\varepsilon = \frac{Q^- + Q^+}{E^+} ? \quad \varepsilon = \frac{Q^+}{E^+} ! \quad \varepsilon = \frac{Q^+}{E^+} ?$$



$$\eta = \frac{E_q}{E^+} \quad \eta = \frac{E_q}{E^+ + E_q^+}$$

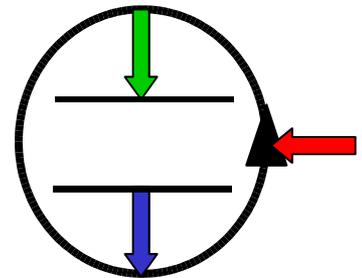
$$\varepsilon = \frac{Q^-}{E^+} ?$$

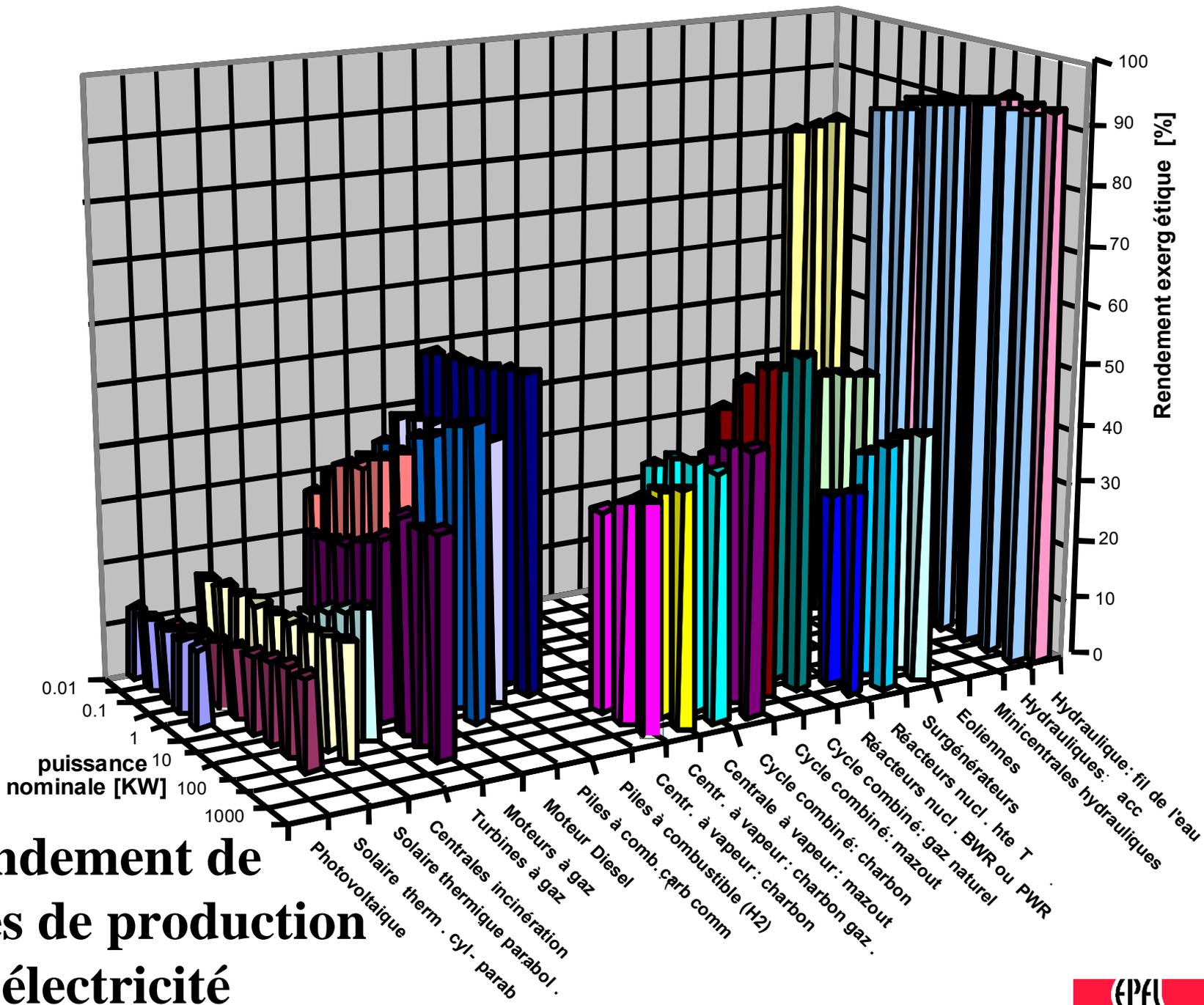
$$\varepsilon = \frac{Q^-}{E^+} ?$$

$$\eta = \frac{E_q}{E^+ + E_q^+}$$

$$\eta = \frac{E_q}{E^+}$$

$$\eta = \frac{E_q + E_q}{E^+}$$





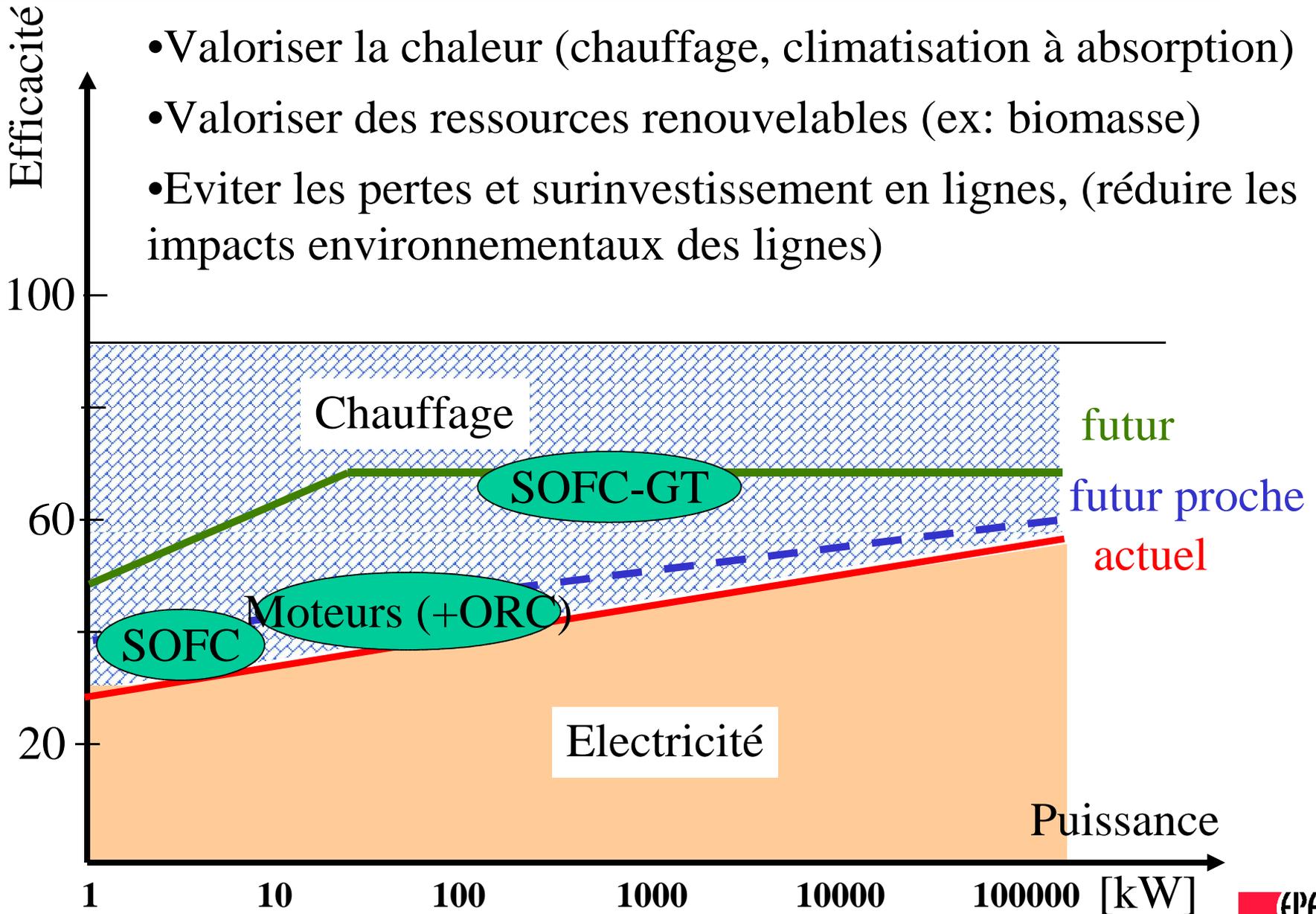
Rendement de systèmes de production d'électricité

Rendements de technologies de production d'électricité

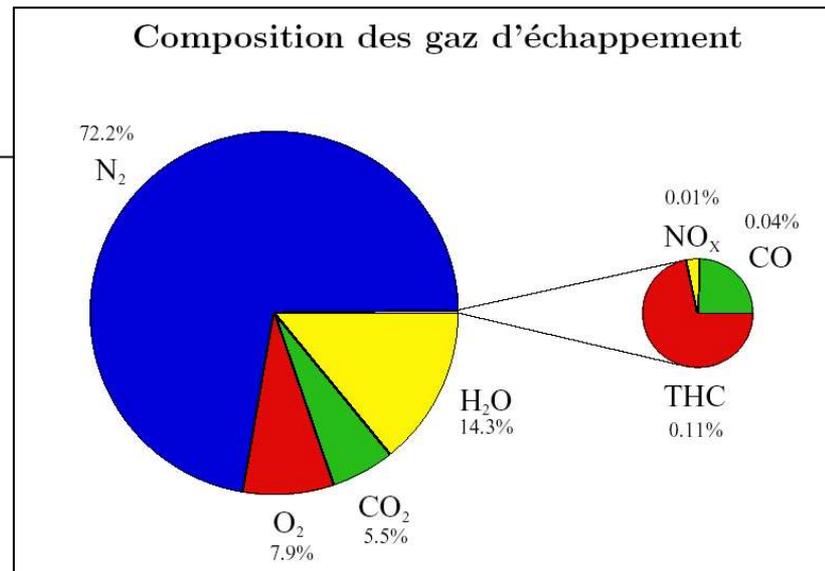
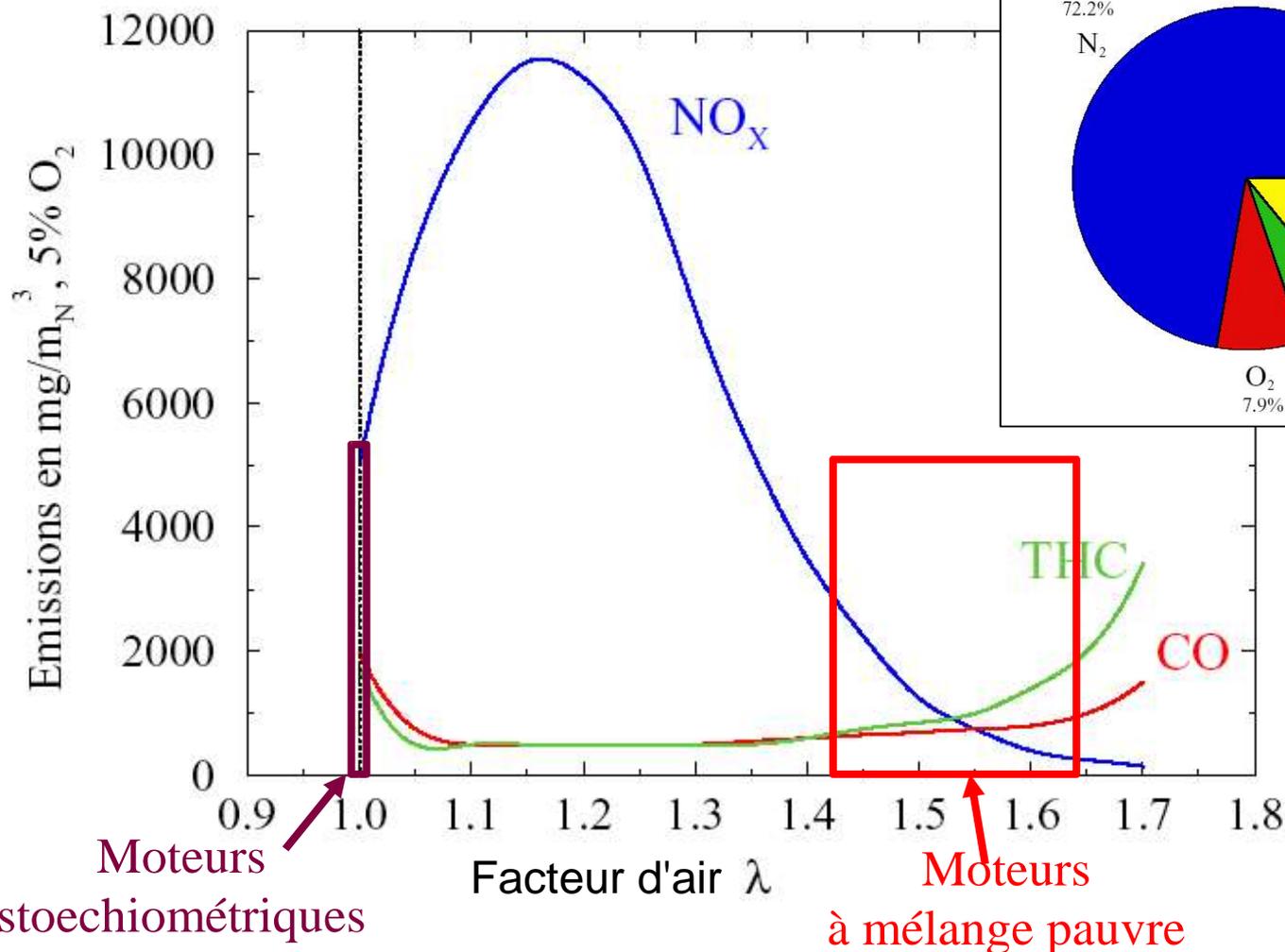
| <i>Puissance en MW</i> | 0.01 | 0.032 | 0.1 | 0.32 | 1 | 3.2 | 10 | 32 | 100 | 320 | 1000 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Photovoltaïque | 12 | 12 | 13 | 13 | 13 | | | | | | |
| Solaire therm. (Cyl.-parab.) | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 15 | | |
| Solaire therm. Parab. | 15 | 16 | 16 | 16 | 17 | 17 | 18 | 19 | 20 | | |
| Centrales incinération | | | | | 16 | 18 | 20 | 22 | | | |
| Turbines à gaz | | | 24 | 25 | 26 | 28 | 31 | 36 | 36 | 37 | |
| Moteurs à gaz | 27 | 32 | 35 | 37 | 39 | 42 | | | | | |
| Moteur Diesel | 31 | 34 | 38 | 3 | 42 | 44 | 47 | 49 | | | |
| Piles à comb. (carb comm.) | | 40 | 41 | 42 | 43 | 43 | 44 | | | | |
| Piles à combustible (H2) | | 50 | 51 | 51 | 52 | 53 | 54 | | | | |
| Centr. à vapeur: charbon | | | | | | | | | 34 | 36 | 38 |
| Centr.à vapeur: charbon gaz. | | | | | | | | | 35 | 37 | 39 |
| Centr. à vapeur: mazout | | | | | | | | 38 | 40 | 41 | 41 |
| Cycle combiné: charbon | | | | | | | | | 40 | 43 | 44 |
| Cycle combiné: mazout | | | | | | | | 45 | 51 | 55 | |
| Cycle combiné: gaz naturel | | | | | | | | 46 | 52 | 56 | |
| Réacteurs nucl. eau légère | | | | | | | | | | 32 | 34 |
| Réacteurs nucl. hte temp. | | | | | | | | | | 38 | 41 |
| Surgénérateurs | | | | | | | | | | 40 | 42 |
| Eoliennes | 30 | 33 | 36 | 39 | 42 | 44 | 45 | | | | |
| Mini centr. hydrauliques | | 81 | 83 | 85 | | | | | | | |
| Hydrauliques: acc. | | | | | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 92 | 92 |
| Hydraulique: fil de l'eau | | | | | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 93 | 93 |

Services énergétiques: cogénération

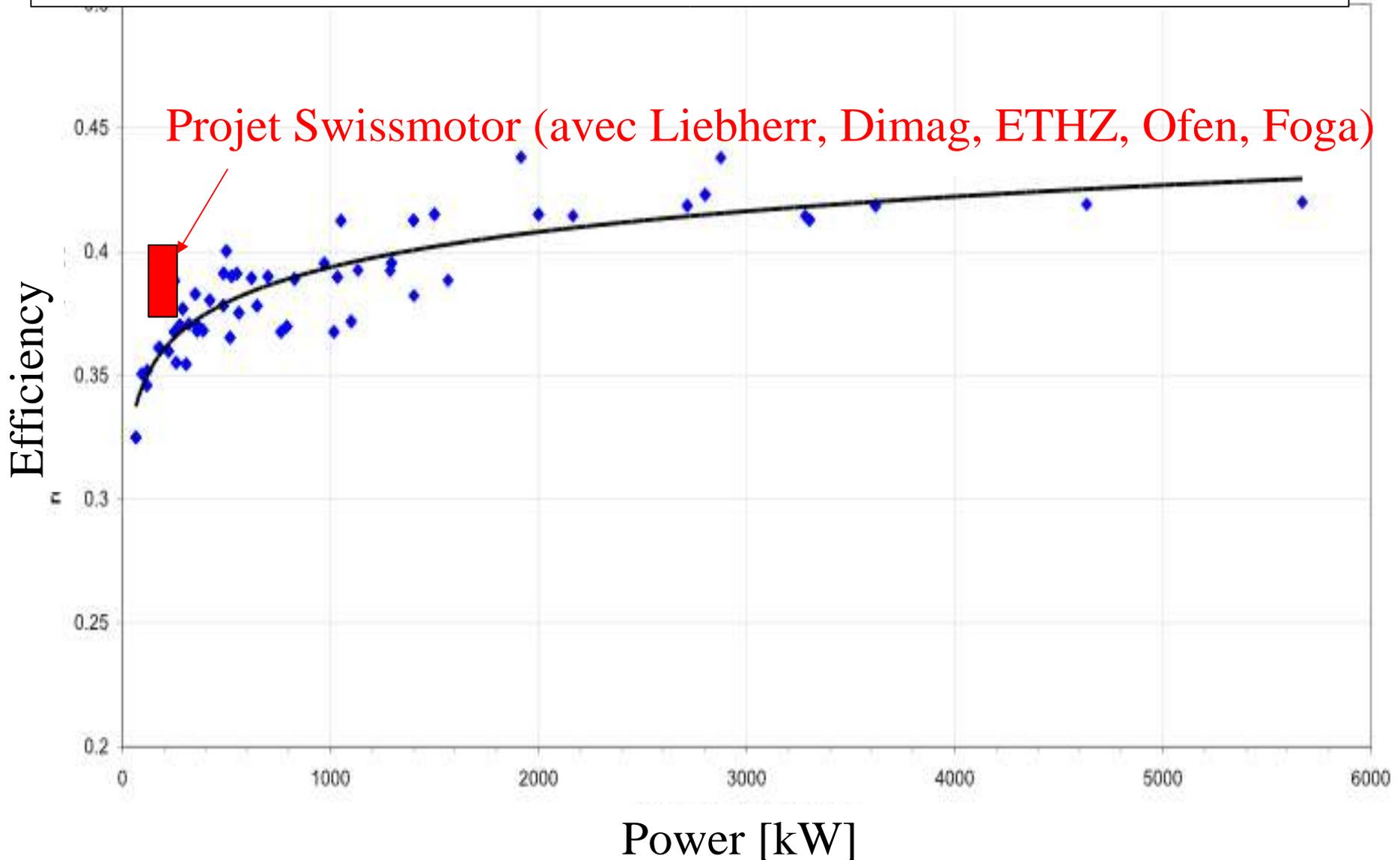
- Valoriser la chaleur (chauffage, climatisation à absorption)
- Valoriser des ressources renouvelables (ex: biomasse)
- Eviter les pertes et surinvestissement en lignes, (réduire les impacts environnementaux des lignes)



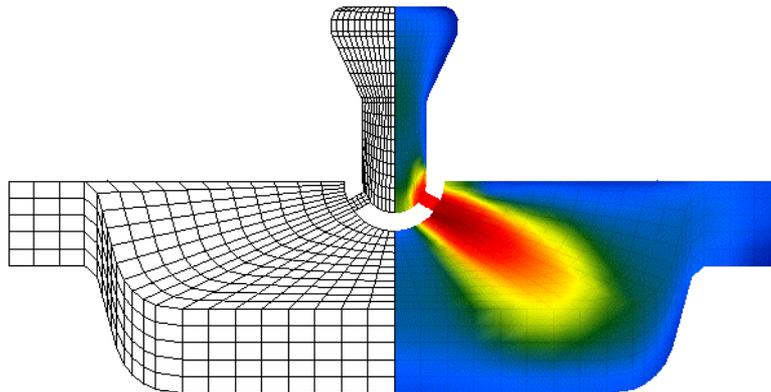
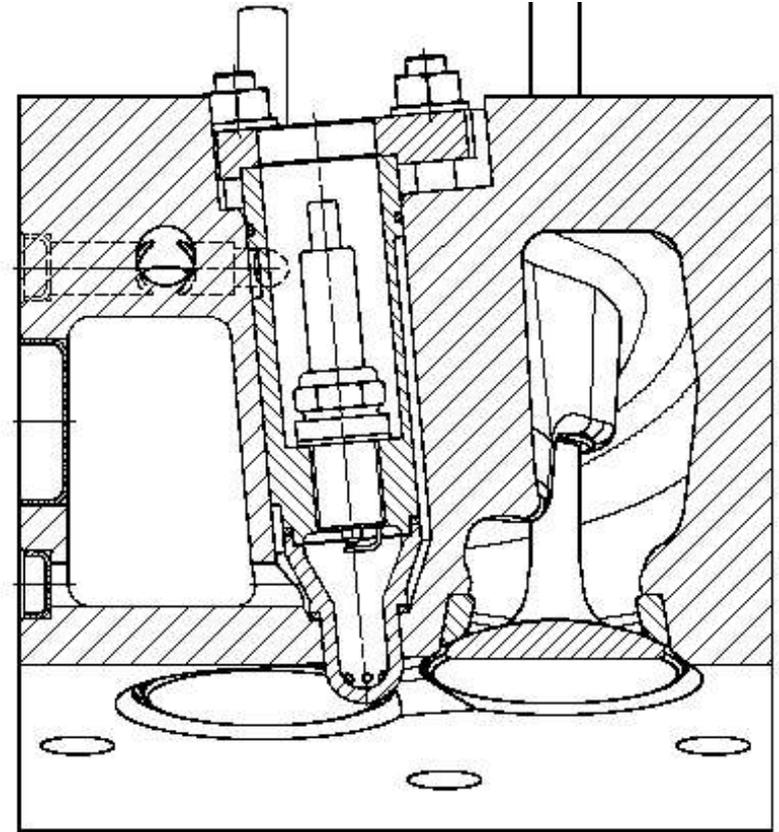
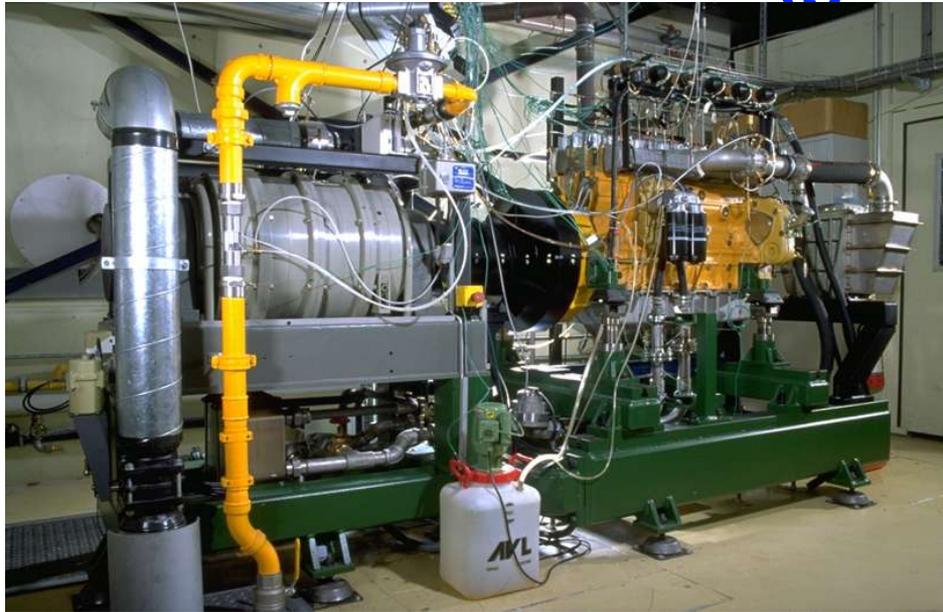
Caractéristiques des émissions des moteurs à gaz en fonction du facteur d'air



Rendement de moteur à gaz en fonction de la puissance: de constants progrès



Moteur à Gaz (gaz naturel ou biogaz)



Thèse Röthlisberger 2001

Préchambres non enrichies en mélange pauvre

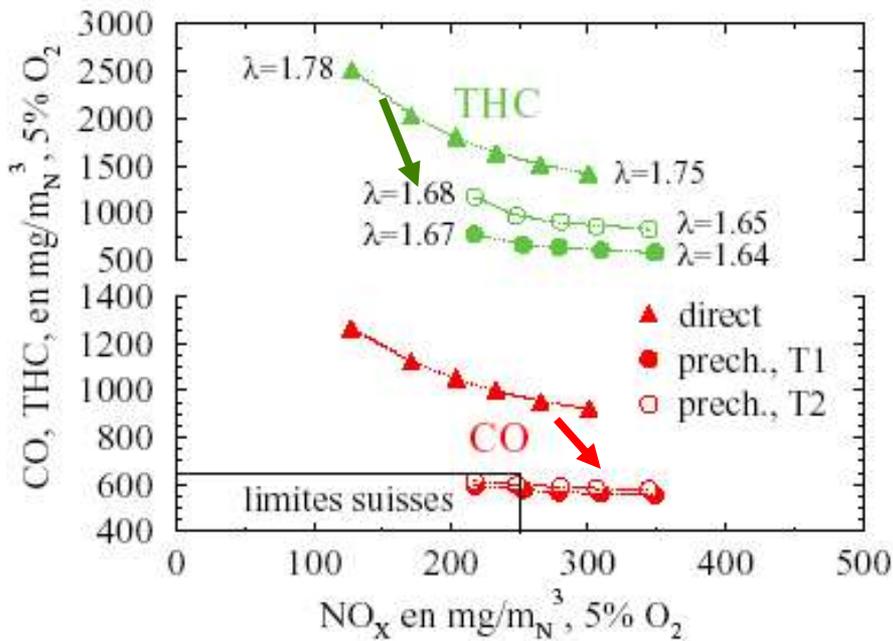
---> émissions réduites (sans catalyseur) et hauts rendements

Perspectives de préchambres à autoallumage homogène (Dr A.roubaud)

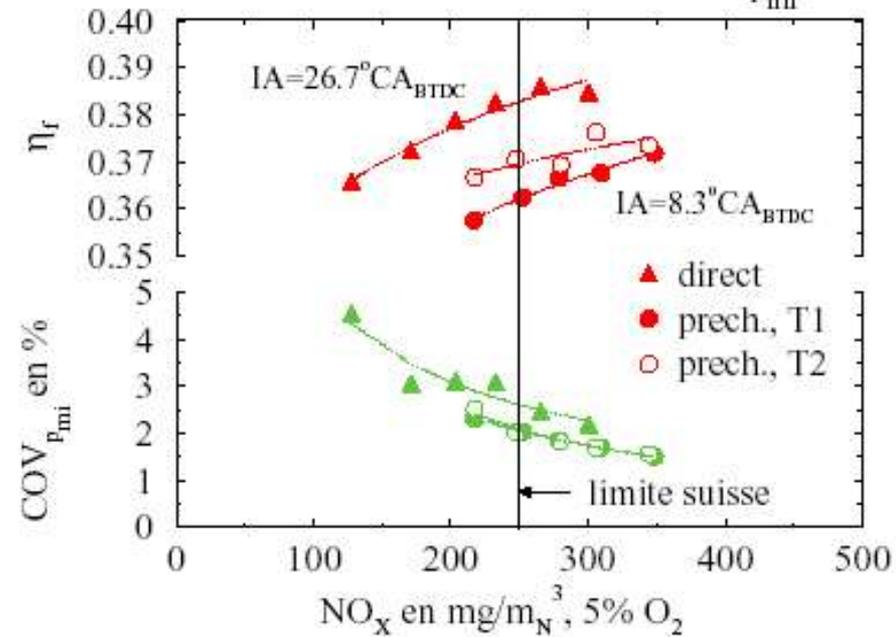
L'éternel compromis entre émissions et rendements

Préchambre versus allumage direct (suite)

Emissions de polluants



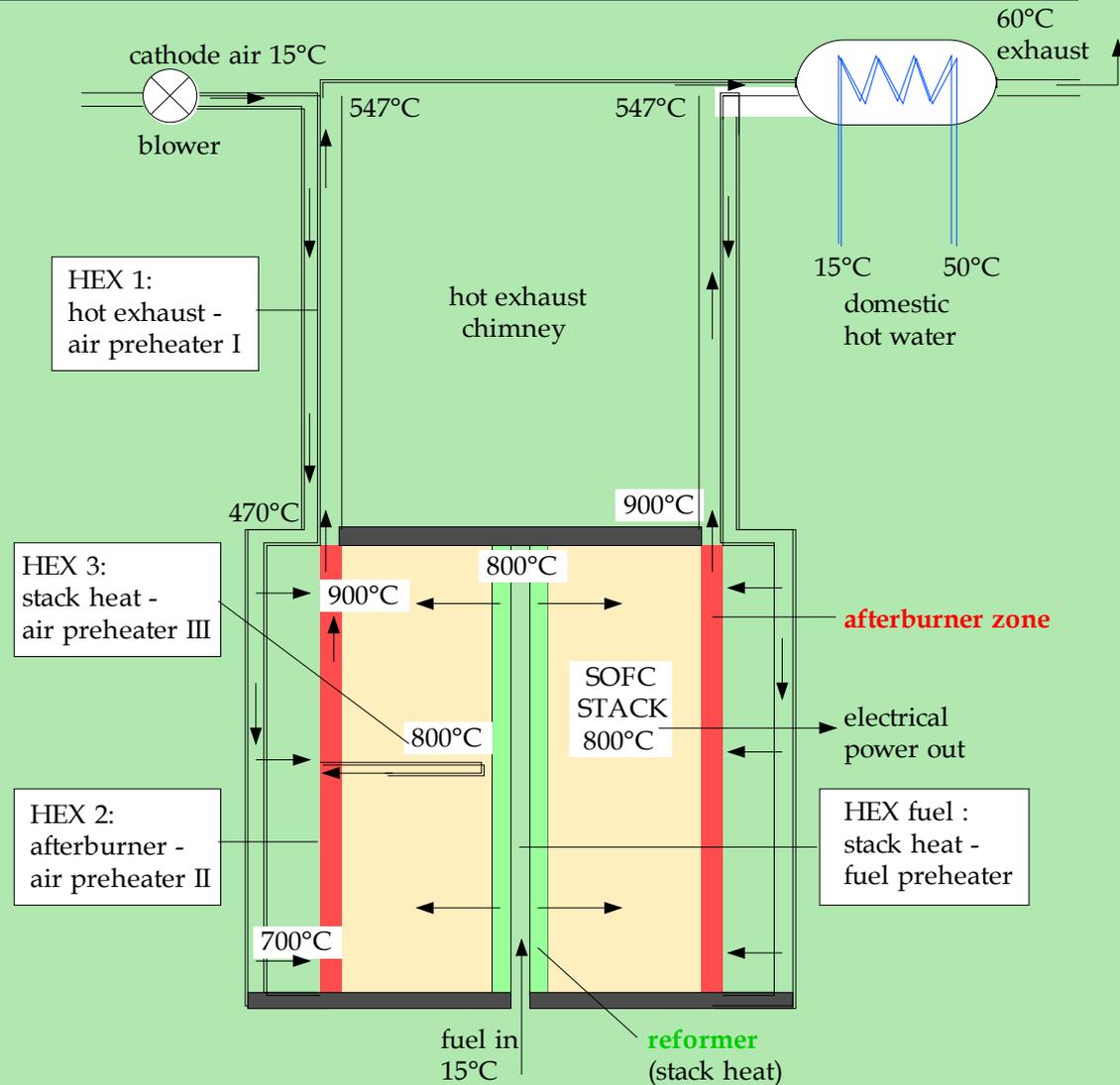
Rendement effectif et COV_{P_{mi}}



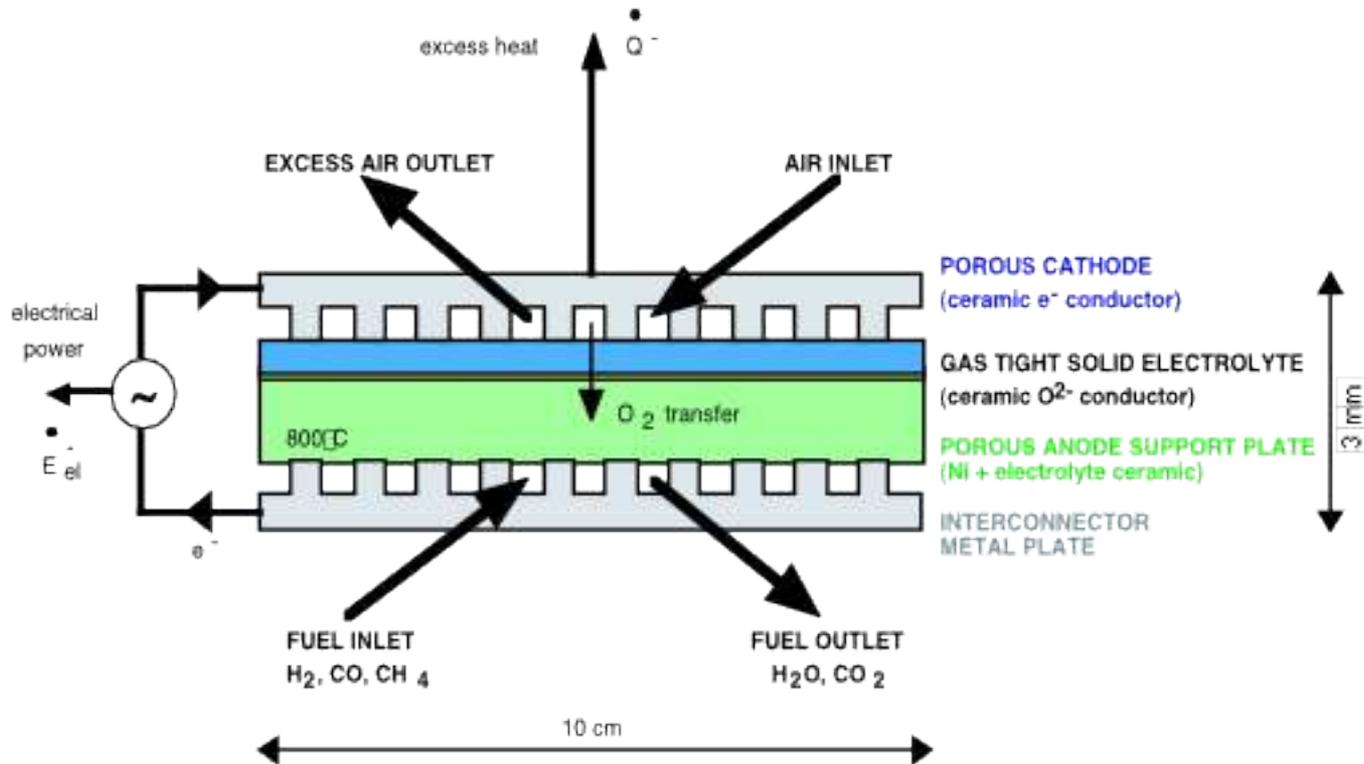
- 40 % et 55 % moins d'émissions de CO et THC, respectivement

Pile à combustible SOFC

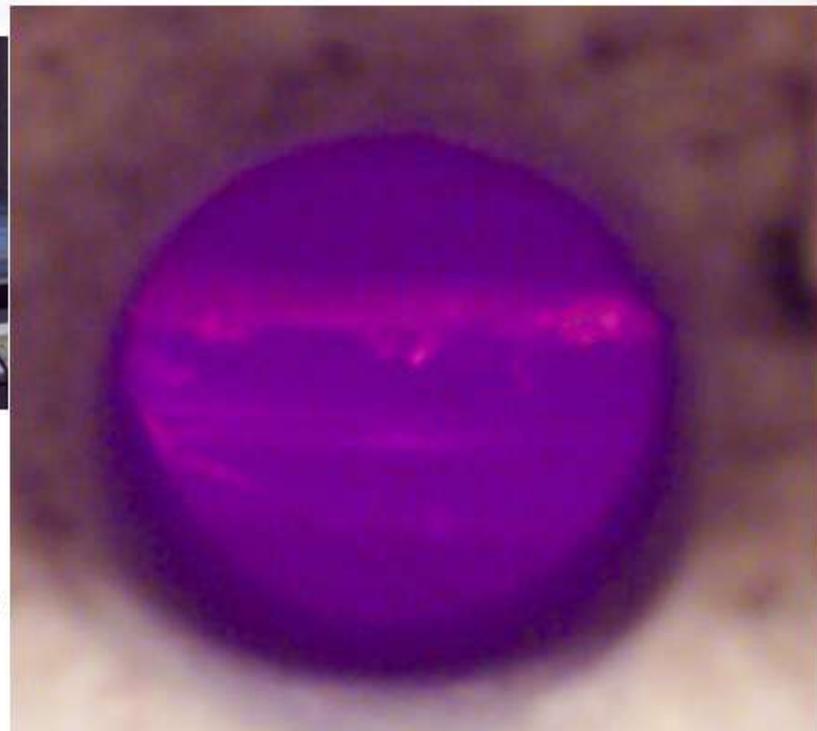
- Haut rendement électrique à faible puissance (35% @ 5 kW_e, 50% @ 100 kW_e)
- Possibilité de conversion de carburant à faible pouvoir énergétique (5% CH₄)
- Sensitivité aux contaminants maîtrisable (NH₃=fuel, 100 ppm H₂S OK)
- Modulaire
- Silencieuse



Principes de base

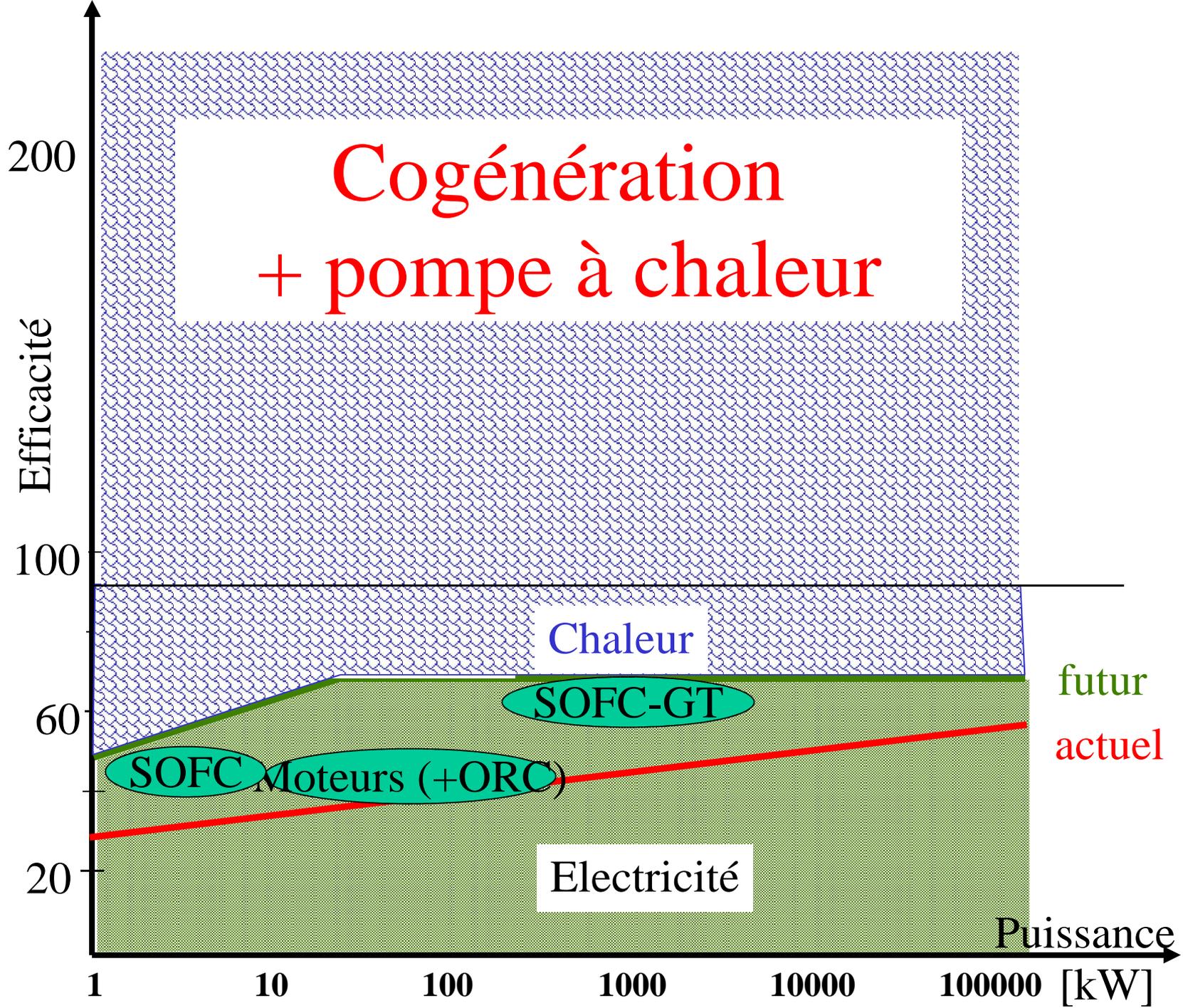


Simulation et tests de Composants de piles à combustible SOFC en cours au LENI

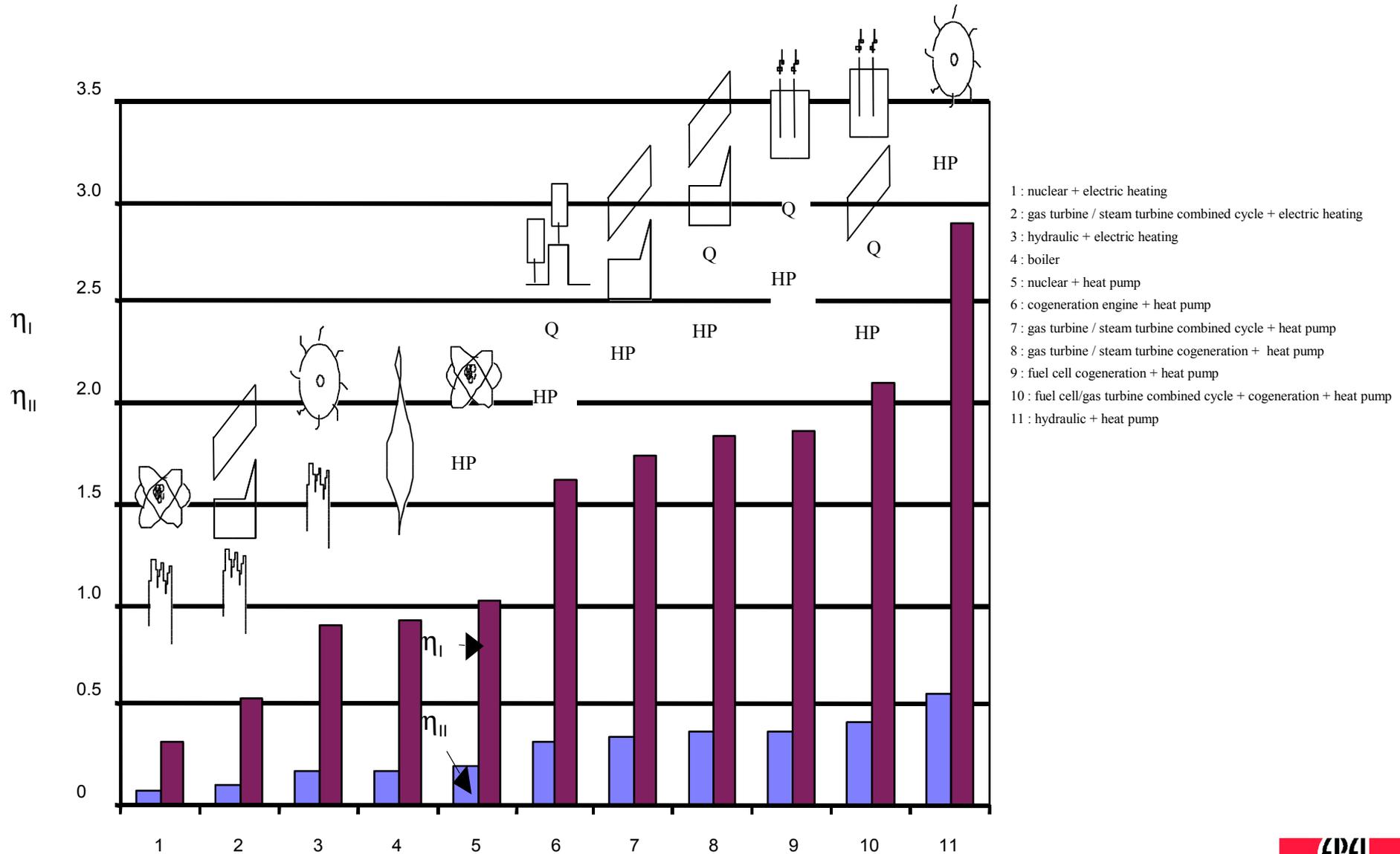


Test de composant en four à 800°C
Collaboration avec
HTCeramik, CTI, LPI



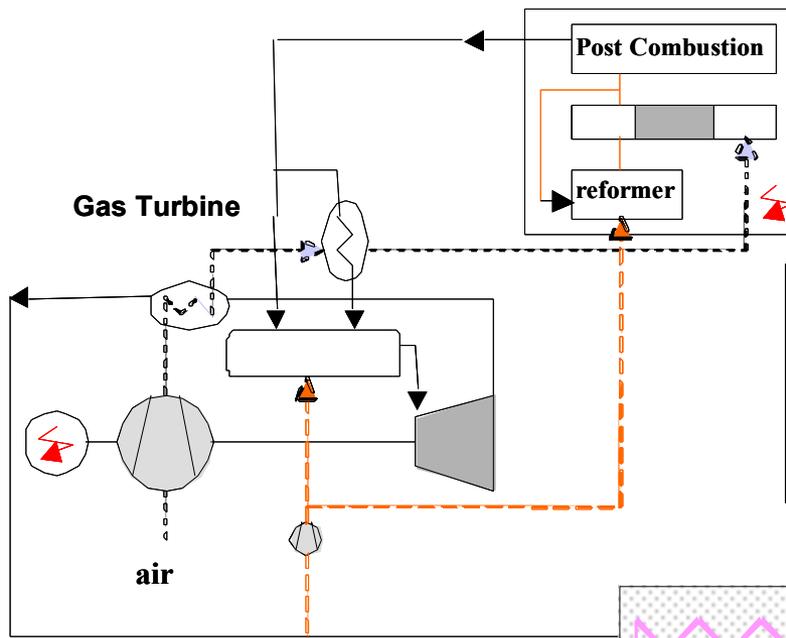


Rendement énergétique et exergétique de technologies intégrées de chauffage



Calcul des rendements énergétiques et exergetique de chauffage (exemples)

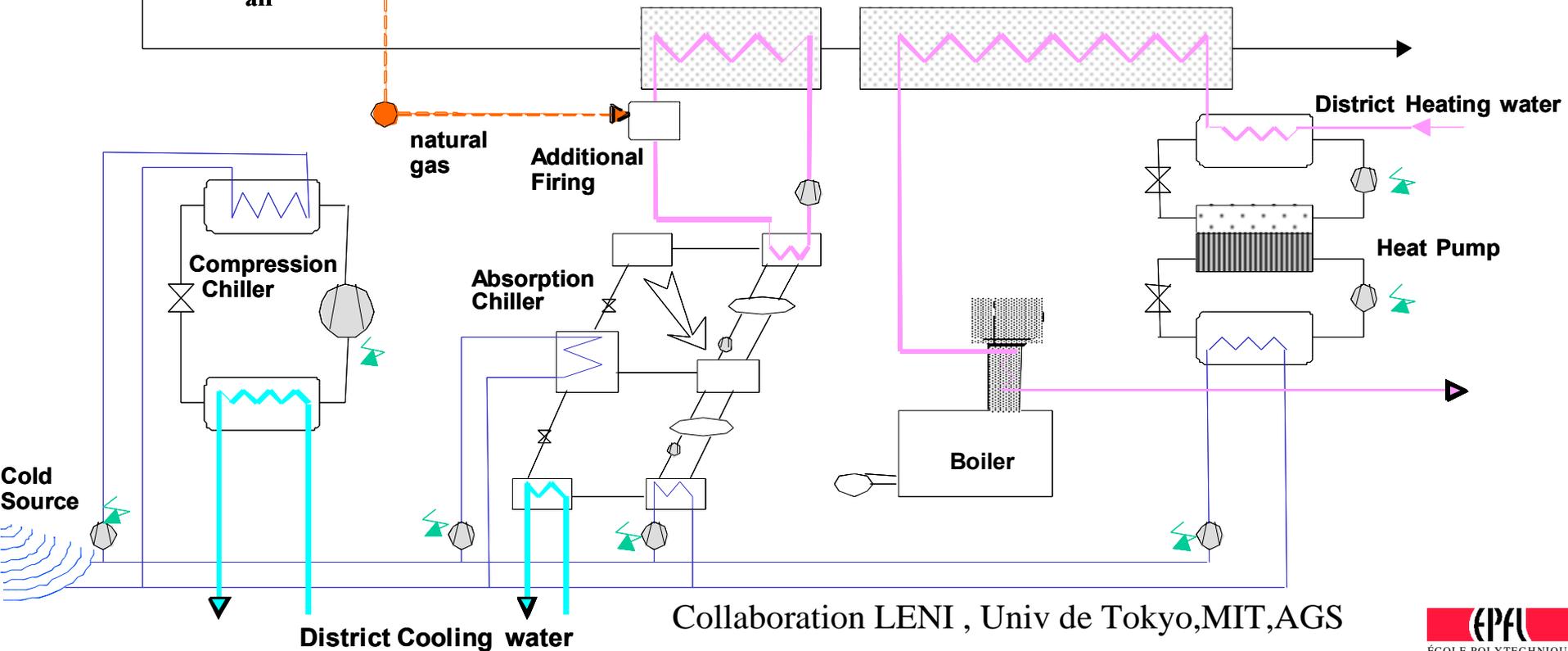
| | eff él PCI | eta él | eff_PCI | eta_th_PEX | eff pac | eff PCI_chauff | Trés ch | eta pAc | eta tot |
|-------------------------------|-------------|--------|-------------|------------|----------|----------------|---------|-------------|---------|
| centrale nucl sans cog+rés él | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0 | 1 | 0.32 | 65 | | 0.061 |
| centrale comb sans cog+rés él | 0.58 | 0.56 | 0.58 | 0 | 1 | 0.54 | 65 | | 0.103 |
| centrale hydr +rés élec | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0 | 1 | 0.88 | 65 | | 0.170 |
| chaudière sans cond | 0 | 0 | 0.91 | 0.88 | 1 | 0.91 | 65 | | 0.175 |
| nucléaire+pac | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0 | 3.33 | 1.00 | 65 | 0.64 | 0.193 |
| moteur cogen à gaz+pac | 0.37 | 0.36 | 0.9 | 0.098 | 3.33 | 1.62 | 65 | 0.64 | 0.312 |
| centrale comb+pac | 0.58 | 0.56 | 0.58 | 0.000 | 3.33 | 1.74 | 65 | 0.64 | 0.335 |
| centrales comb avec cogén+pac | 0.47 | 0.45 | 0.9 | 0.080 | 3.33 | 1.83 | 65 | 0.64 | 0.352 |
| pile à combustible à cog+pac | 0.48 | 0.46 | 0.9 | 0.078 | 3.33 | 1.85 | 65 | 0.64 | 0.356 |
| cc à pile à comb à cog+pac | 0.60 | 0.58 | 0.9 | 0.056 | 3.33 | 2.10 | 65 | 0.64 | 0.404 |
| centrale hydraulique+pac | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.000 | 3.33 | 2.89 | 65 | 0.64 | 0.556 |



Solid Oxide Fuel Cell

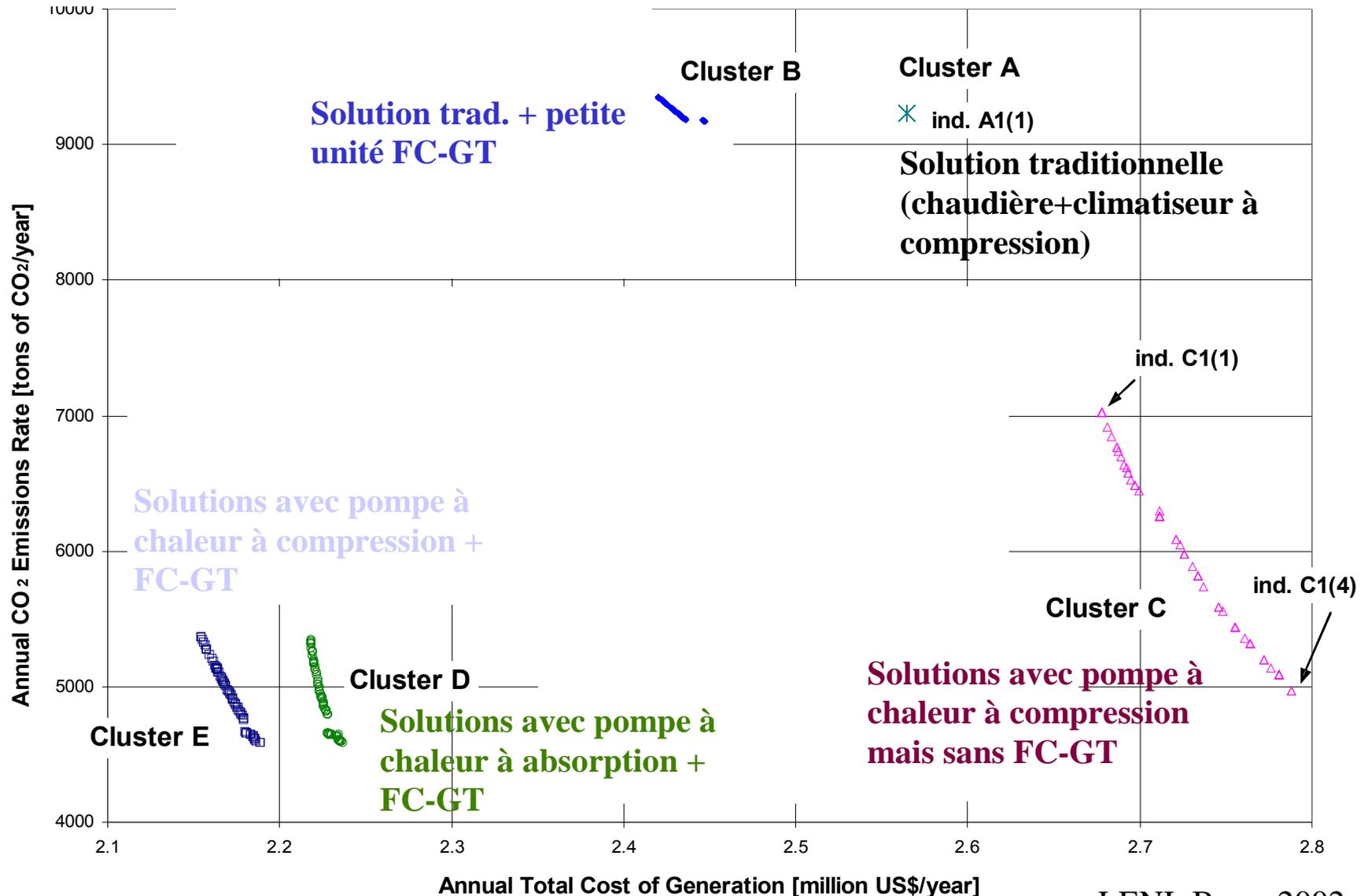
Technologies intégrées: Services énergétiques (électricité, chaleur, froid): Superstructure d'optimisation

Heat Recovery Device



Collaboration LENI , Univ de Tokyo, MIT, AGS

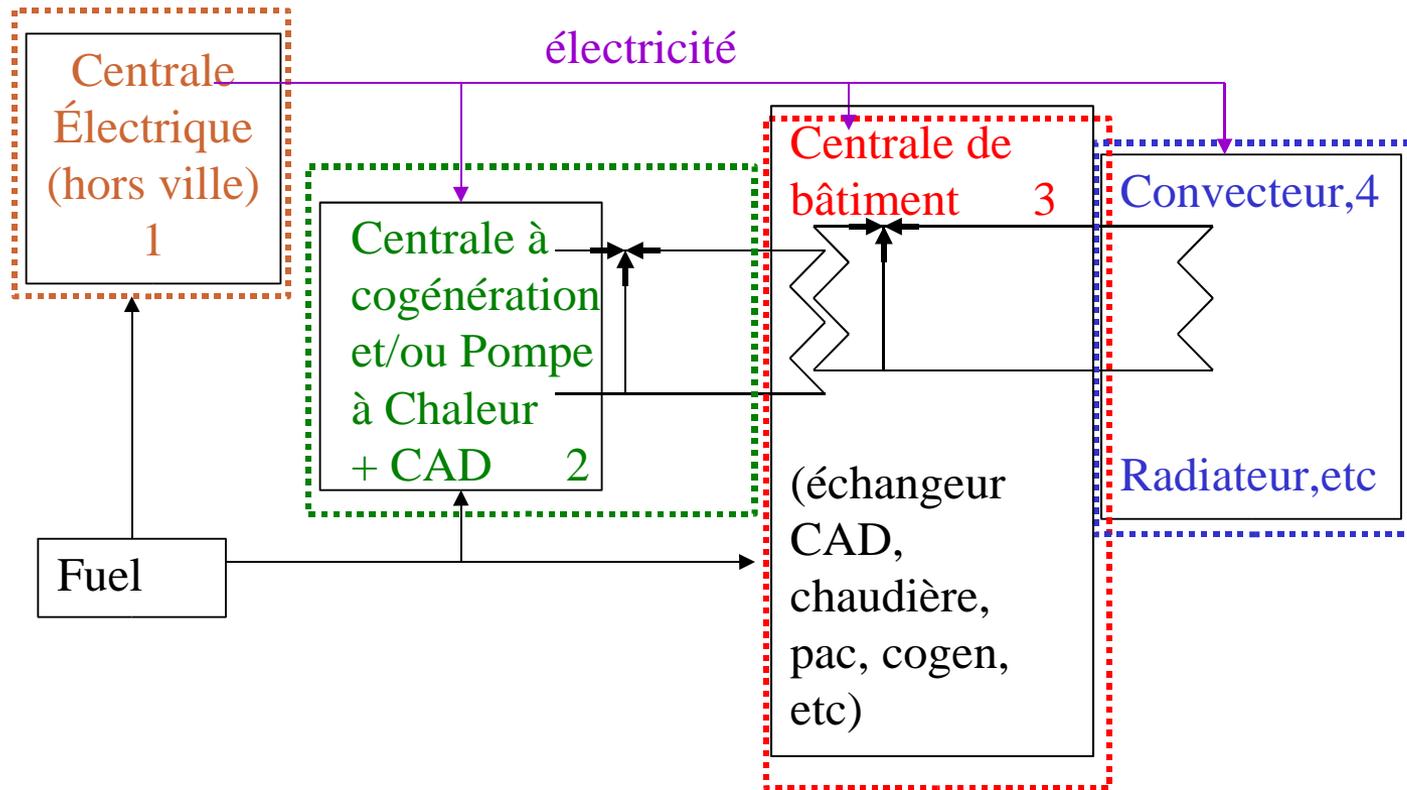
Optimisation (sans exportation d'électricité) d'une centrale fournissant 10MWth de chauffage et 5 MWth de climatisation: utilisation d'un algorithme évolutif (génétique)



Rendement exergetique

- **Est un indicateur de la qualité avec laquelle l'homme convertit ses ressources**
- **Ne donne pas:**
 - **d'indications concernant l'utilisation de ressources renouvelables ou pas,**
 - **ne prend pas en compte le degré relatif des difficultés de conversion d'une énergie primaire donnée. Par exemple l'énergie solaire par sa faible densité de rayonnement est plus difficile à convertir que le pétrole ou le gaz naturel et les systèmes de conversion solaire conduisent à des rendements plus faibles,**
 - **ne donne pas d'indications sur les impacts sur l'environnement local (polluants affectant la santé) et seulement indirectement sur l'environnement global**

Du local au global



Exemple: centrale à cycle combiné sans cogénération (1)+pompe à chaleur de réseau de CAD(2)+échangeur CAD de bâtiment (3) +convecteur (4)

$$\eta = \left(\frac{\dot{E}_{e1}}{\dot{E}_{y1}} \right) \left(\frac{\dot{E}_{y2}}{\dot{E}_{e2}} \right) \left(\frac{\dot{E}_{y3}}{\dot{E}_{y3}} \right) \left(\frac{\dot{E}_{q4}}{\dot{E}_{y4}} \right) = \frac{\dot{E}_{q4}}{\dot{E}_{y1}}$$

Conclusions

- Importance du concept d'exergie
- Les techniques moteurs ne sont pas mortes et il existe des marges d'amélioration non négligeables
- Les piles à combustibles notamment SOFC sont prometteuses (mais défi scientifique et technique)
- L'avenir est aussi aux systèmes intégrant plusieurs technologies et services (notamment des unités de cogénération et des pompes à chaleur)
- Nos méthodes d'analyse s'appuyant sur l'optimisation à l'aide d'algorithmes évolutifs nous permettent d'y voir de plus en plus clair (approches holistiques). A nous tous de les exploiter!

Quelques références (noms soulignés = membres actuels du LENI)

- van Herle J., Membrez Y, Favrat D., *Energy balance model for a SOFC cogenerator operated with biogas*, Symposium on Fuel cells Science and Technology, Amsterdam, Sept 2002
- Larrain D., van Herle J., Maréchal F., Favrat D., *Thermal modeling of an anode supported SOFC cell*, Symposium on Fuel cells Science and Technology, Amsterdam, Sept 2002
- Burer M., Favrat D., Tanaka K., Yamada K., *Multicriteria optimisation of a district heating cogeneration plant integrating a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine combined cycle, heat pumps and chillers*, accepted for publication in: Energy. The International Journal
- Roethlisberger R.P., Favrat D., *Comparison between direct and indirect (prechamber) spark ignition in the case of a cogeneration naturel gas engine, part I and II*, Applied Thermal Engineering, vol 22, N 11, pp1217-1243, 2002
- Roubaud A., Roethlisberger R.P., Favrat D., *Unscavenged Combustion Prechamber as a way to improve efficiency and emissions of a lean-burn cogeneration biogas engine: comparison with natural gas*, ECOS 2002, Berlin, July 2002, also accepted for publication in Int Journal of Applied Thermodynamics
- Favrat D., Les cycles de Rankine ou comment générer de l'électricité à partir de sources thermiques à basses ou moyennes températures. Symposium Froid, Yverdon (Suisse), Nov 2001
- Pelster S., Favrat D., von Spakovsky M., *The thermo-economic and environmental modeling and optimization of the synthesis, design and operation of combined cycles with advanced options*, Journal of Engineering for Gas turbine and Power, Vol 123 (4), 2001, pp 717-726
- Multi objective optimisation of energy systems with a new evolutionary algorithm: voir thèses LENI, Leyland G et Molyneaux A, 2002
- Kalitventzeff B., Marechal F., *Optimal insertion of energy saving technologies in industrial processes : a web based tool helps in developments and coordination of a european R&D project*. Applied Thermal Engineering, Vol. 20 (15-16), pp. 1347-1364, (2000)