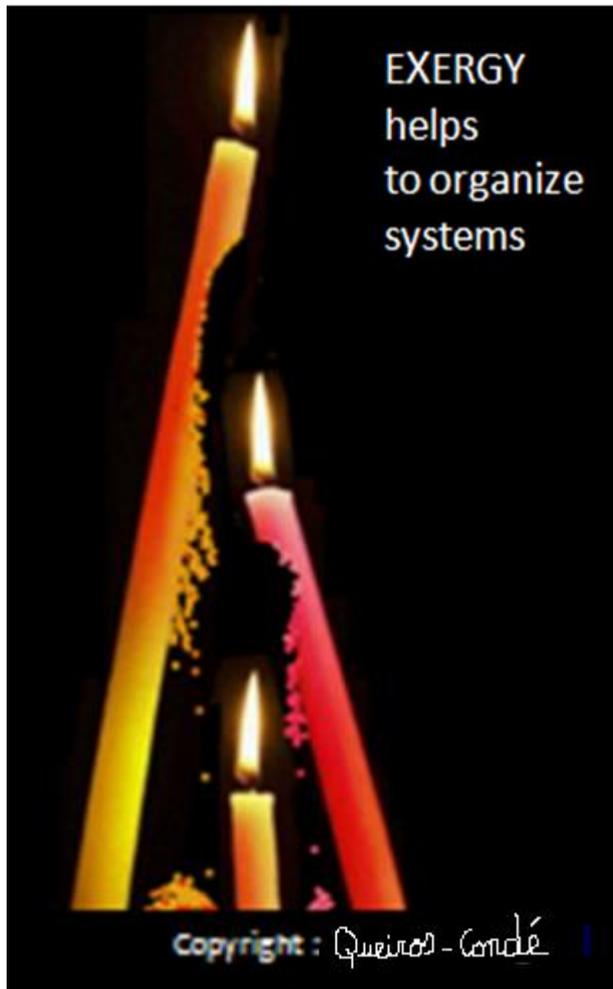


# Exergie pour une Ville durable (...et vivable)

**Diogo Queiros-Condé**

Pôle Scientifique et Technologique de Ville d'Avray - Lab. Energétique Mécanique Electromagnétisme (LEME)  
Université Paris Ouest Nanterre la Défense

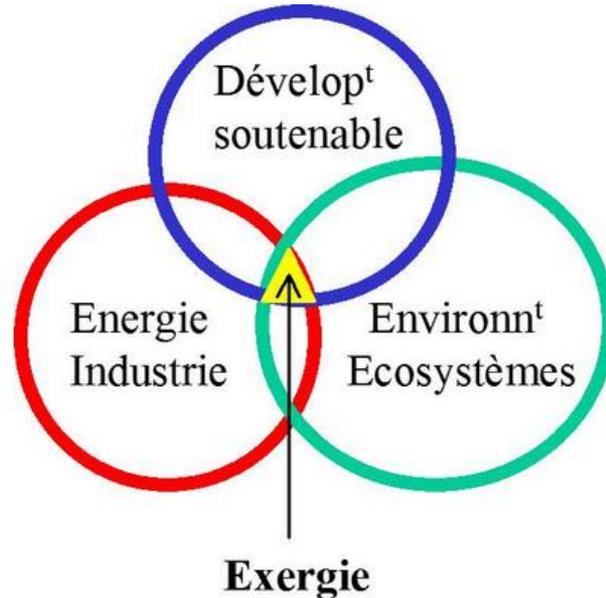


« Système bien agencé...énergie économisée! »  
Pierre ROCHELLE

L'analyse exergétique permet l'optimisation structurelle d'un système énergétique et une économie substantielle d'énergie primaire (ex: Pinch analysis)

# L'EXERGIE, de l'énergie à l'écologie un outil d'analyse et de décision pour un Développement Durable

**EXERGIE**



**ECO-EXERGIE**

Pourquoi l'exergie  
sera la quantité physique  
du 21<sup>e</sup> siècle?

Site **EXERGY SYSTEMICS: Energy, structure and information**

30 documents pédagogiques et de recherche sur l'exergie dans le domaine des systèmes énergétiques

<https://www.parisnanterre.fr/exergy-systemics-energy-structure-and-information-520823.kjsp>

Site **EXERGY SYSTEMICS: Energy, structure and information**

<https://leme.u-paris10.fr/exergy-systemics-energy-structure-and-information-520823.kjsp>

# Trois échelles pour aborder les problèmes liés à l'énergie

1. Phénomènes physiques et sciences fondamentales
2. Machines et Systèmes énergétiques
3. Logistiques énergétiques: échelles urbaines, nationales et géopolitiques

→ **EXERGY SYSTEMICS: Energy, structure and information**

# Les villes doivent se transformer ... l'exemple tragique de Berlin



Berlin, années 1930 – Leipziger Strasse



Berlin, 2015 – Leipziger Strasse

# Le téléphérique de Medellin (Colombie) Transcender la Ville



# Émeutes 2005 dans la Région Parisienne

Un « téléphérique-tramway » vers Clichy-sous-Bois ?

« Clichy-sous-Bois: une des villes les plus enclavées de la petite couronne parisienne. »

TRANSPORT

## Hollande annonce le tramway T4 pour 2018 à Clichy-sous-Bois

Publié le 03/09/2014 • Par avec l'AFP • dans : [Actualité club Technique](#), [Régions](#)



Fait assez inédit, le Président de la République a annoncé lui-même, mardi 2 septembre 2014, la date de 2018 pour la fin des travaux du tramway T4 devant desservir Montfermeil et Clichy-sous-Bois, symboles des banlieues déshéritées et enclavées de Seine-Saint-Denis.

## De Paris vers le « Grand Paris »

*Paris change plus vite que le cœur d'un homme.*

Walter Benjamin, né à Berlin – 1935



La tour Eiffel noyée sous un nuage de particules fines, le 18 mars 2015 à Paris. (FRANCK FIFE / AFP)

Paris, le 18 mars 2015 → « Paris, ville la plus polluée au monde »

# Le Développement Durable est-il une mode ?

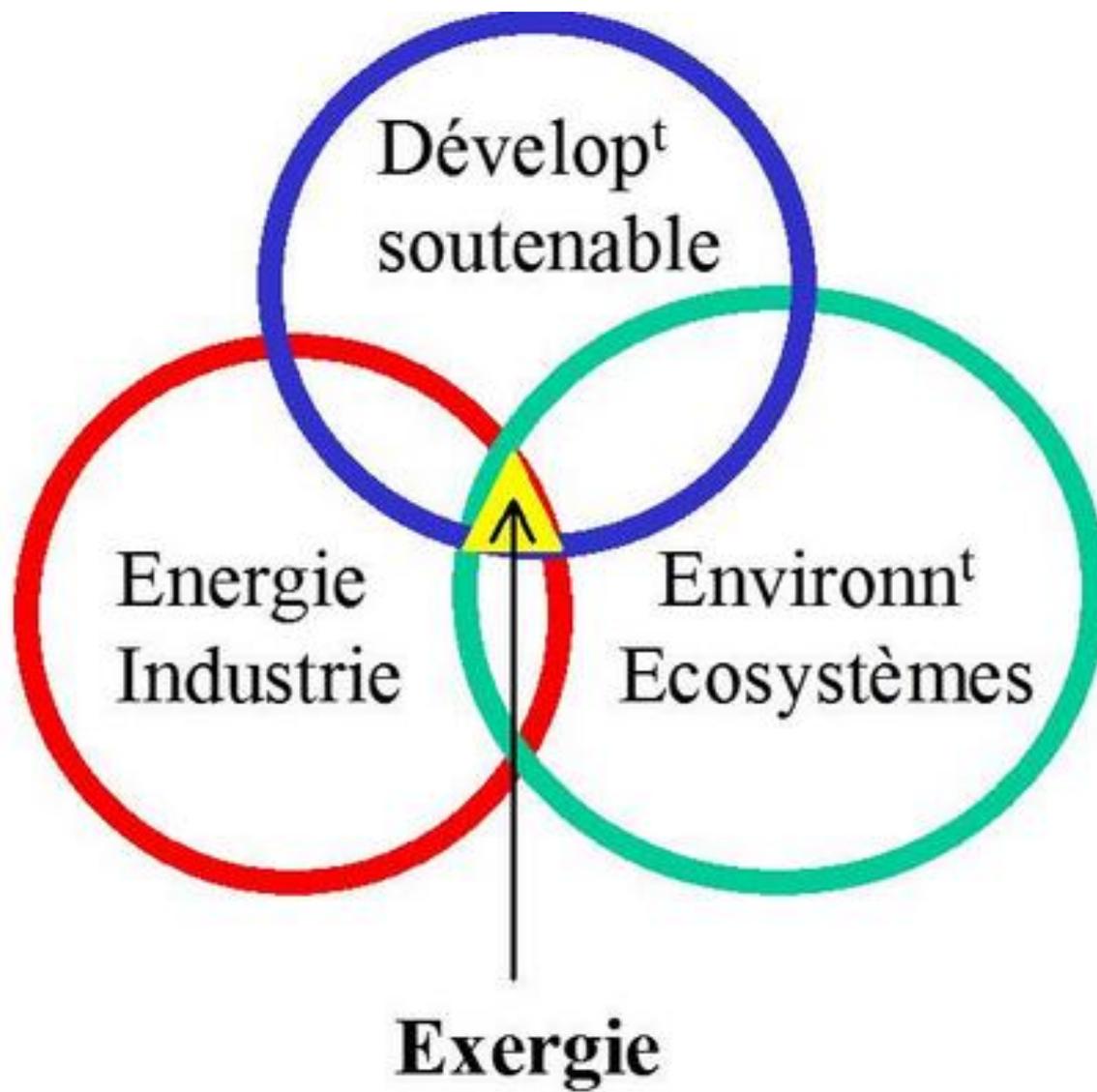


Paris, le 18 mars 2015 → « Paris, ville la plus polluée au monde »



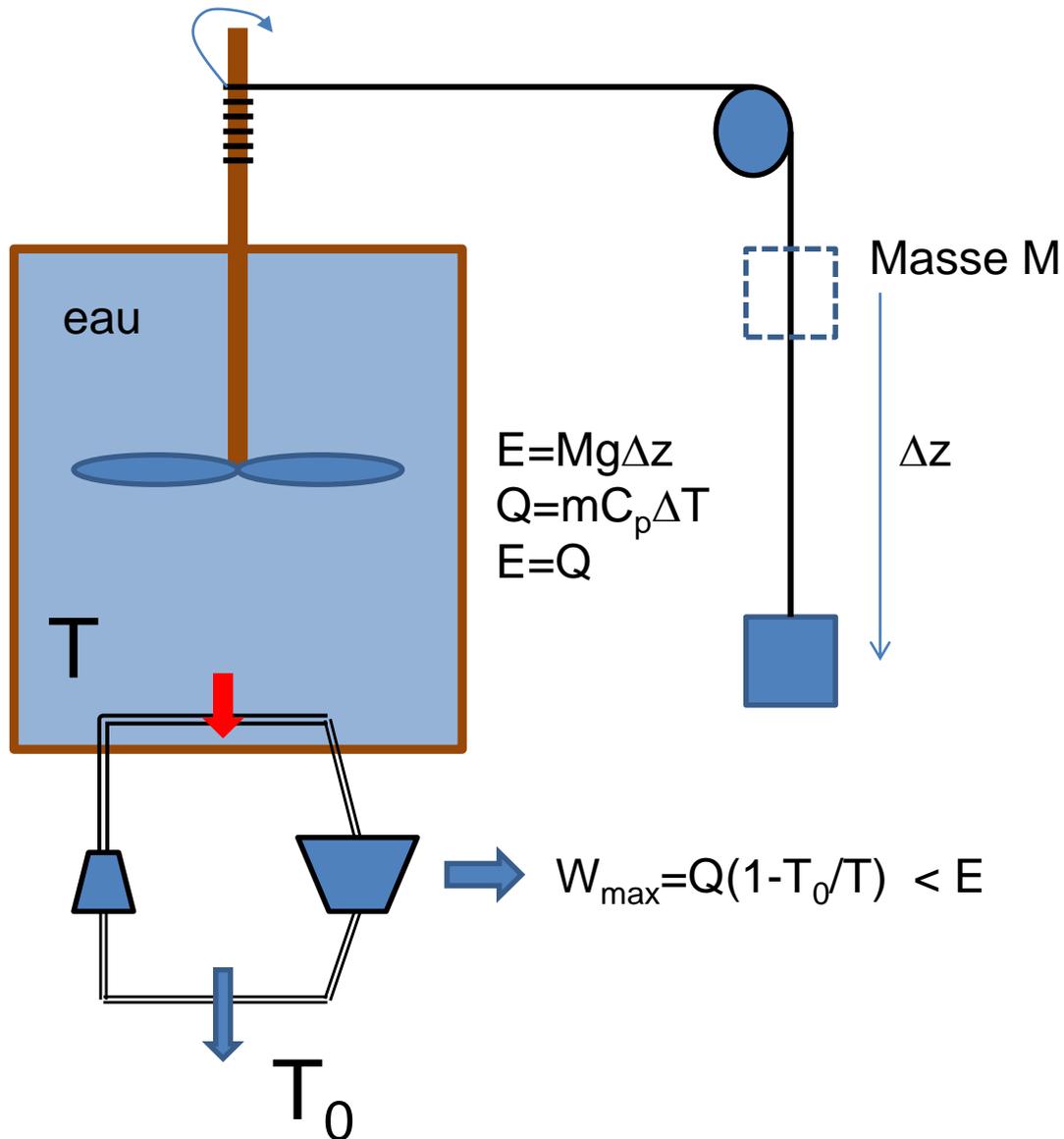
Plaque impaire





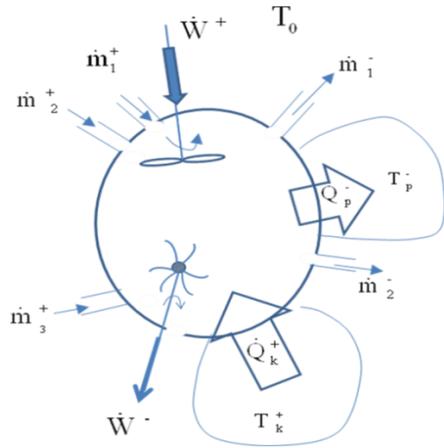
# Energie: conservation et dégradation (déformation)

PREMIER PRINCIPE  
Conservation de l'énergie



SECOND PRINCIPE  
Dégradation (déformation)  
de l'énergie

# Equation de Gouy-Stodola



## énergie

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=1}^{n^+} \dot{m}_i^+ \left[ h_i^+ + (1/2)v_i^{+2} + gz_i^+ \right] - \sum_{j=1}^{n^-} \dot{m}_j^- \left[ h_j^- + (1/2)v_j^{-2} + gz_j^- \right] + \dot{W}^+ - \dot{W}^- + \sum \dot{Q}_k^+ - \sum \dot{Q}_p^-$$

## entropie (anergie)

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{i=1}^{n^+} \dot{m}_i^+ s_i^+ - \sum_{j=1}^{n^-} \dot{m}_j^- s_j^- + \sum \frac{\dot{Q}_k^+}{T_k^+} - \sum \frac{\dot{Q}_p^-}{T_p^-} + \dot{\Pi}$$

## exergie

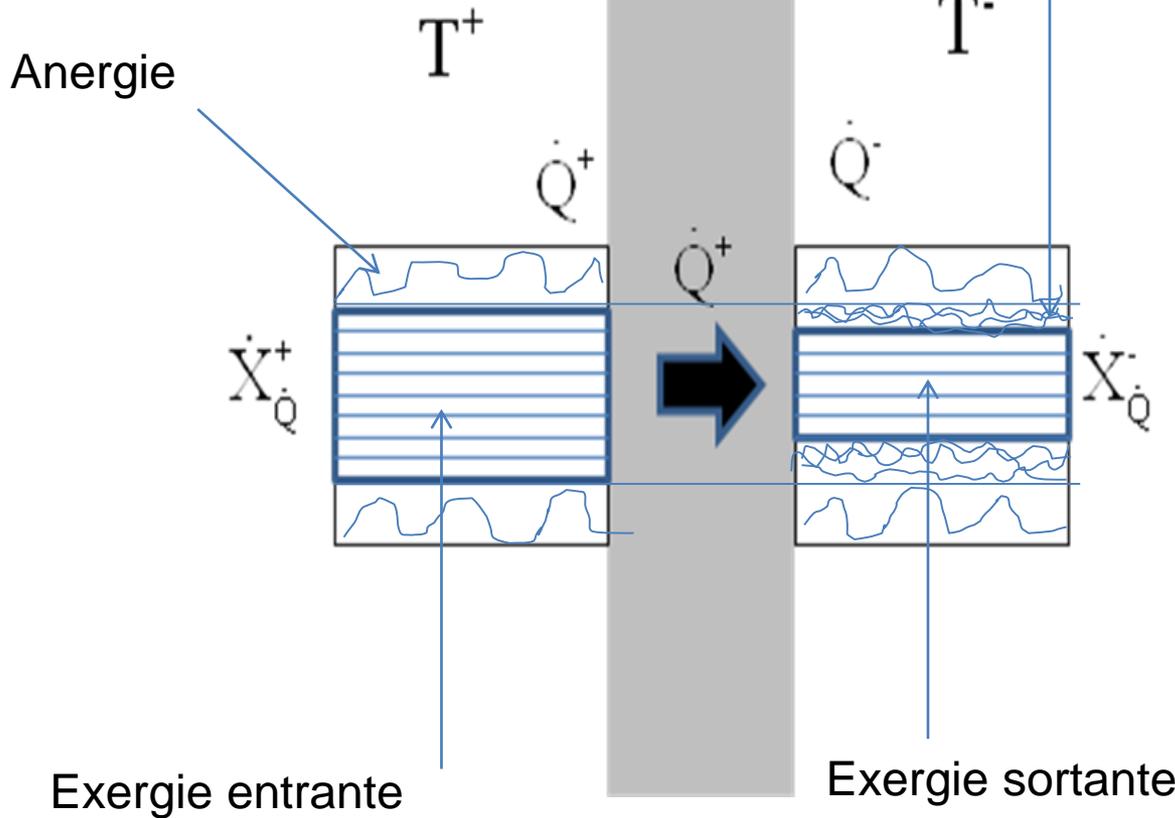
$$\sum_{i=1}^{n^+} \dot{m}_i^+ \left[ h_i^+ - T_0 s_i^+ \right] - \sum_{j=1}^{n^-} \dot{m}_j^- \left[ h_j^- - T_0 s_j^- \right] + \dot{W}^+ - \dot{W}^- + \sum \dot{Q}_k^+ \left( 1 - \frac{T_0}{T_k^+} \right) - \sum \dot{Q}_p^- \left( 1 - \frac{T_0}{T_p^-} \right) - T_0 \dot{\Pi} = 0$$

Flux de destruction d'exergie  
(en **Watt X** ( $W_x$ ))

**Proposition pédagogique;** unité Joule X et Watt X  
(Queiros-Condé, 2003) pour les termes d'exergie

# EXERGIE: fraction mécanisable d'une énergie, qualité d'une énergie

Destruction d'exergie  
due au transfert de chaleur



$$\theta^+ = 1 - \frac{T_0}{T^+}$$

$$\theta^- = 1 - \frac{T_0}{T^-}$$

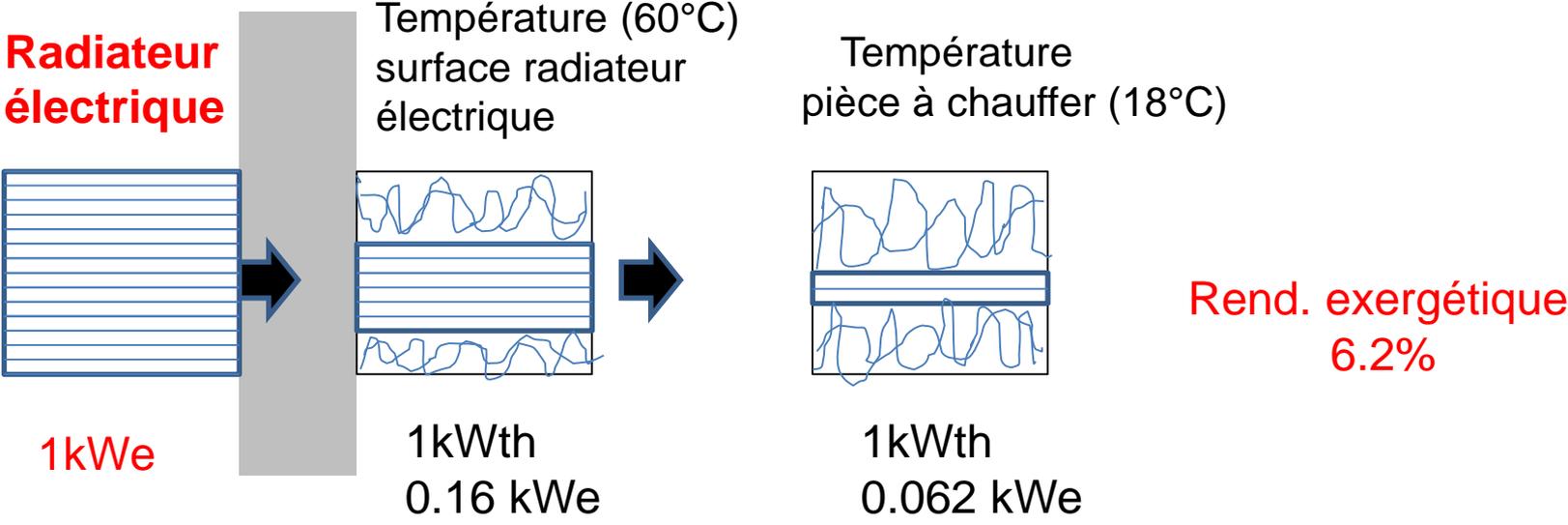
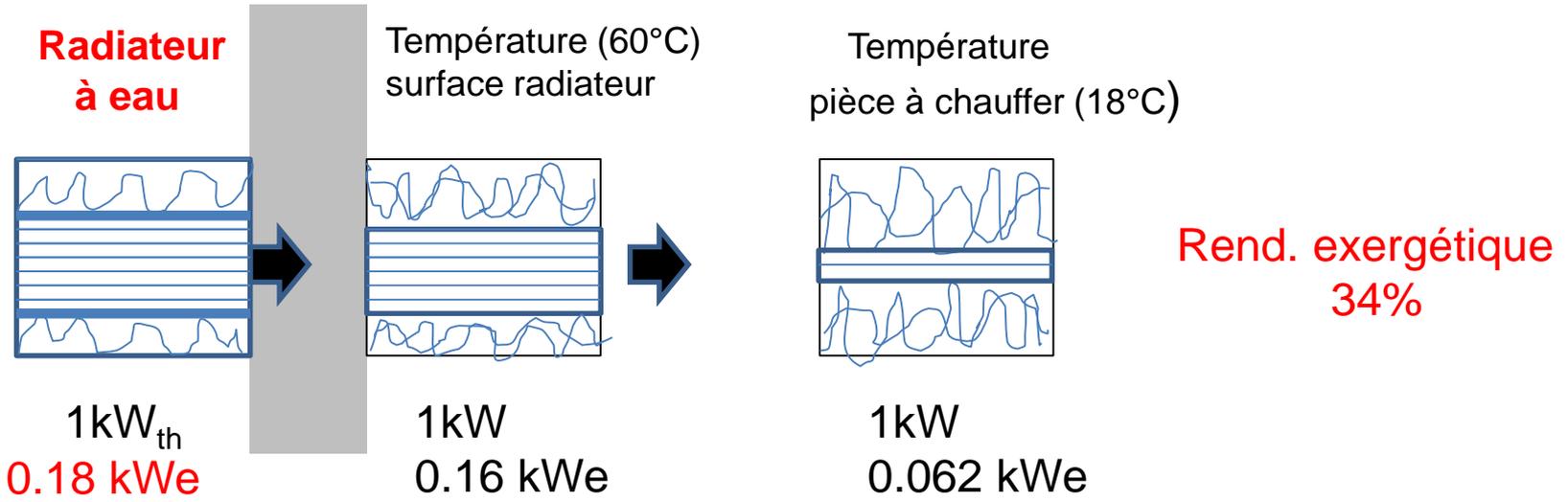
$$\dot{Q}^+ = -\dot{Q}^- = \dot{Q}$$

$$\dot{X}_{\dot{Q}}^+ = \dot{Q}^+ \theta^+$$

$$\dot{X}_{\dot{Q}}^- = \dot{Q}^- \theta^-$$

$$\dot{\Omega} = \dot{X}_{\dot{Q}}^+ - \dot{X}_{\dot{Q}}^- = \dot{Q}(\theta^+ - \theta^-)$$

# Aberration thermodynamique du chauffage électrique



## Histoire récente du Danemark

1985      Chauffage électrique interdit au Danemark

2015      40 % de la consommation nationale, énergies renouvelables

**Pourquoi pas en France  
(Bretagne...) ?**



## Potentiel exergétique des gaz d'échappement: calcul simple, résultat vertigineux



Automobile moyenne :

Cylindrée moyenne: 2000 cm<sup>3</sup>

Vitesse de rotation moyenne: 3000 tr/min

Température gaz échappement sortie cylindre 550-600°C

Parc automobile français: environ 40 millions de voitures

Hypothèse: 5 à 10% de voitures en fonctionnement au même moment

Puissance perdue par les gaz d'échappement

Puissance électrique équivalente perdue

**Flux d'exergie total équivalent 50 GWe ! ( 50 Gigawatts électriques!)**

**Potentiel exergétique des gaz d'échappement en France: puissance  
électronucléaire française!**

**Pour bien expliquer et communiquer l'importance de l'exergie, il faut avoir compris ce qu'est l'entropie et l'expliquer aux décideurs de manière simple.**

ASPECTS FONDAMENTAUX → SIMPLIFICATION

Géométriser la notion d'entropie

Thermodynamique multi-échelles

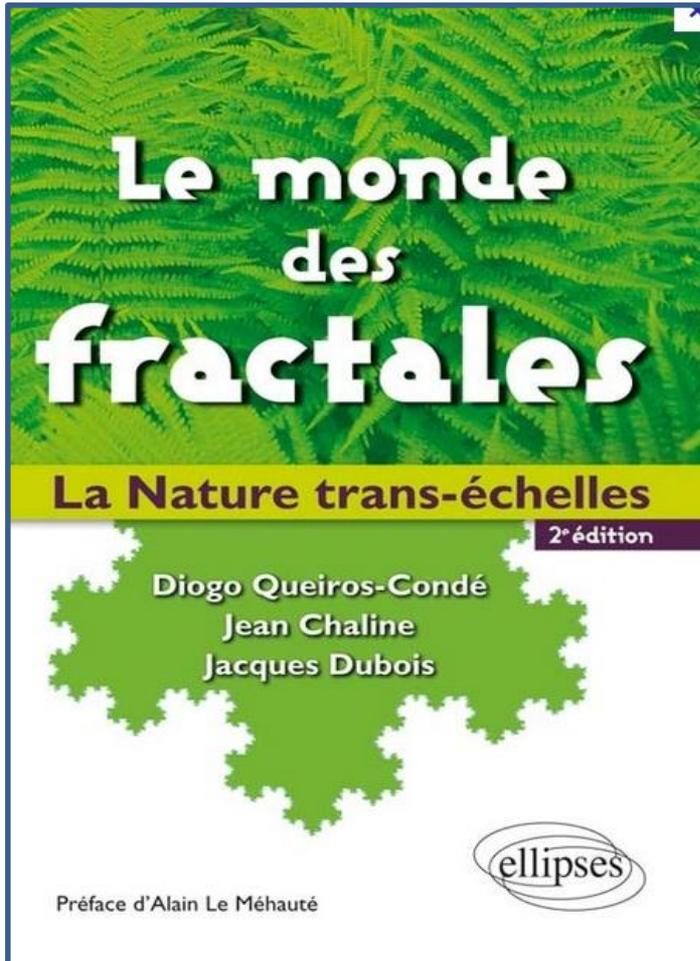
Les échelles de l'entropie

**Thermodynamique**  
+  
**Dynamiques trans-échelles**

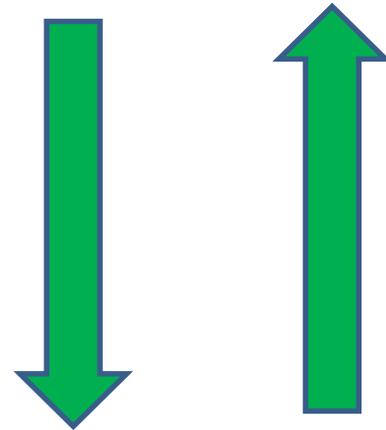


**Thermodynamique trans-échelles**

Un premier pas...



La Nature  
trans-échelles



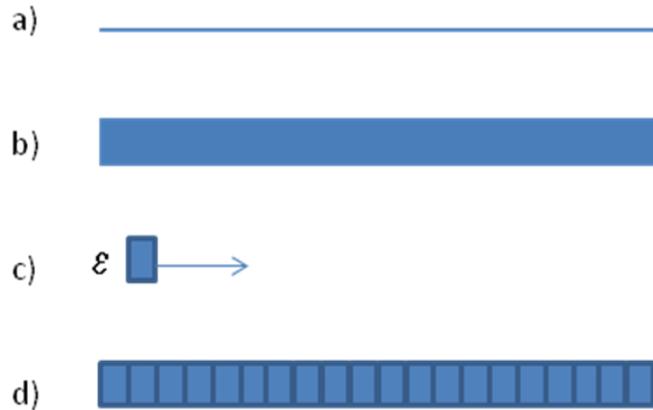
La Ville  
trans-échelles

# FRACTAL AND TRANS-SCALE NATURE OF ENTROPY

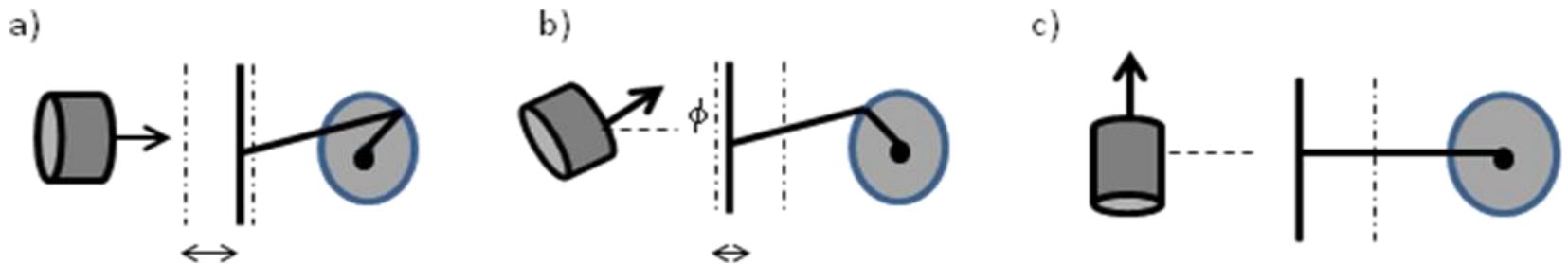
Towards a geometrization of thermodynamics

D. Queiros-Condé and M. Feidt

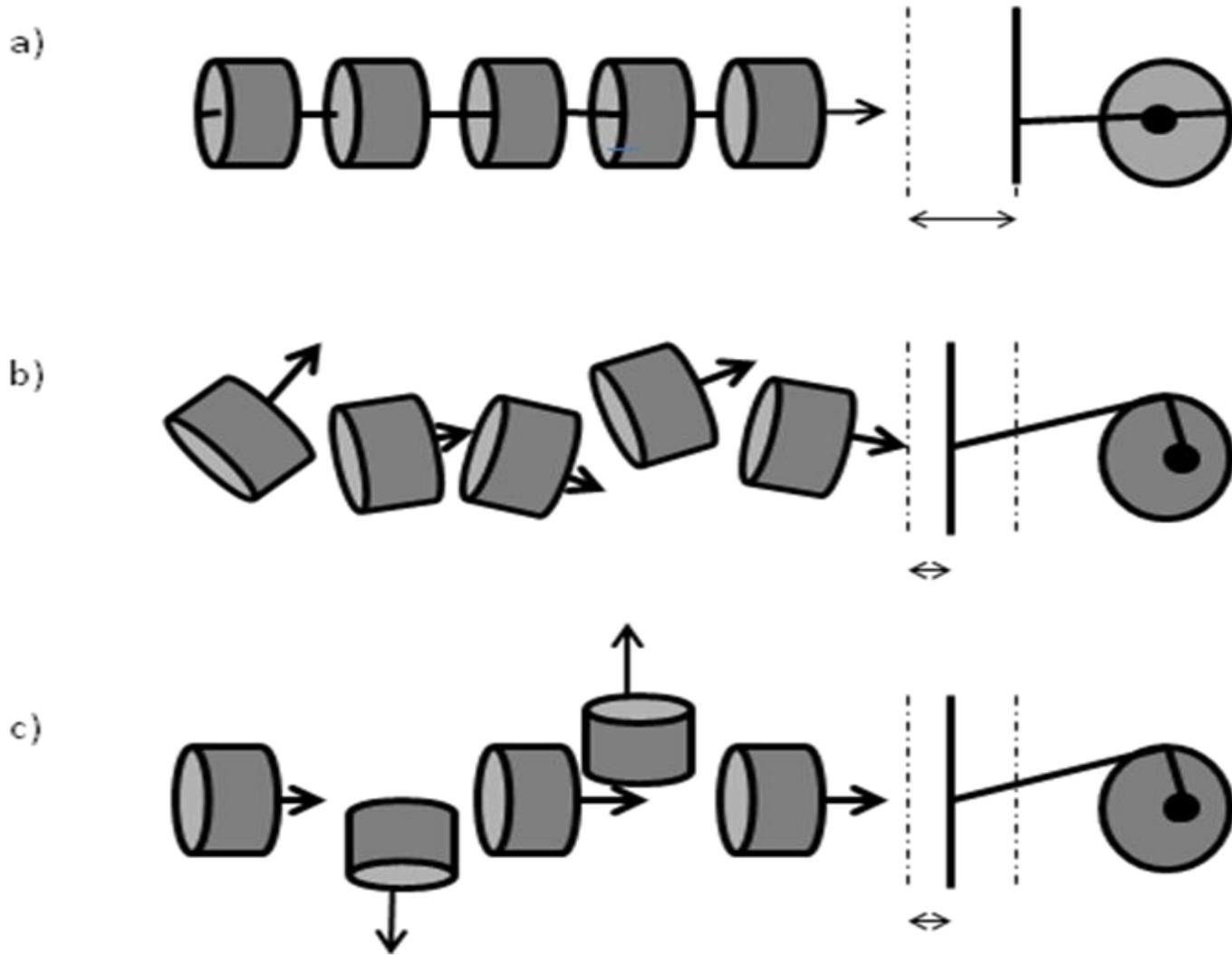
Novembre 2018, Elsevier

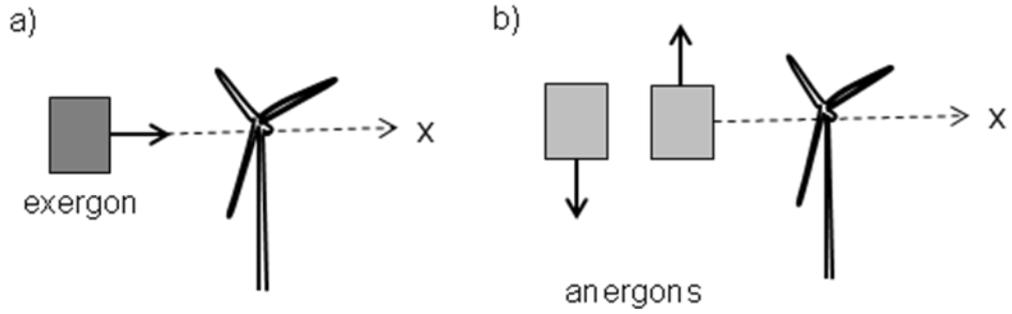


Granularité d'une ligne

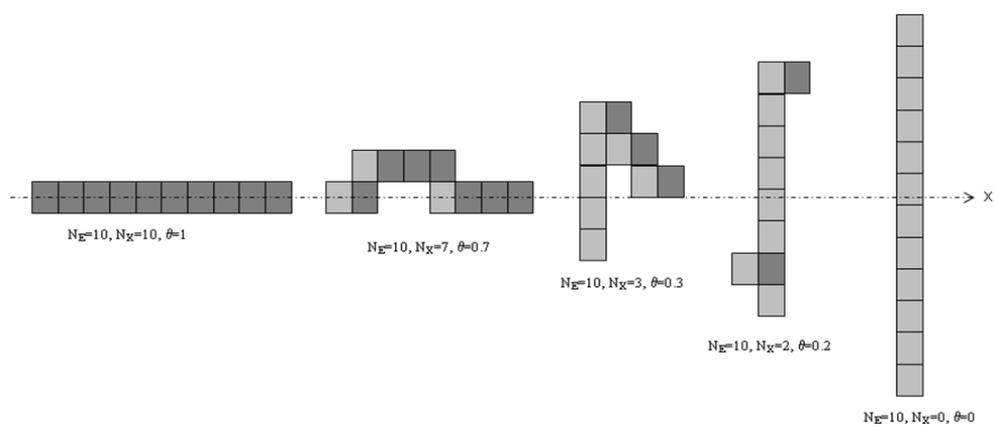
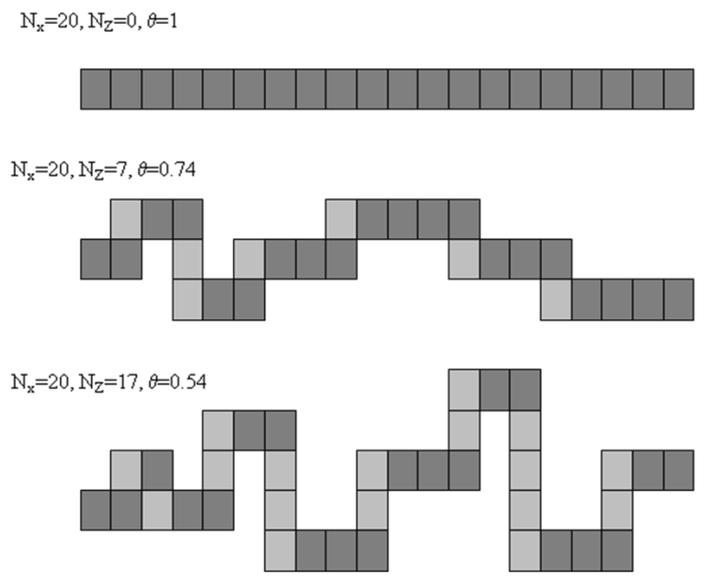


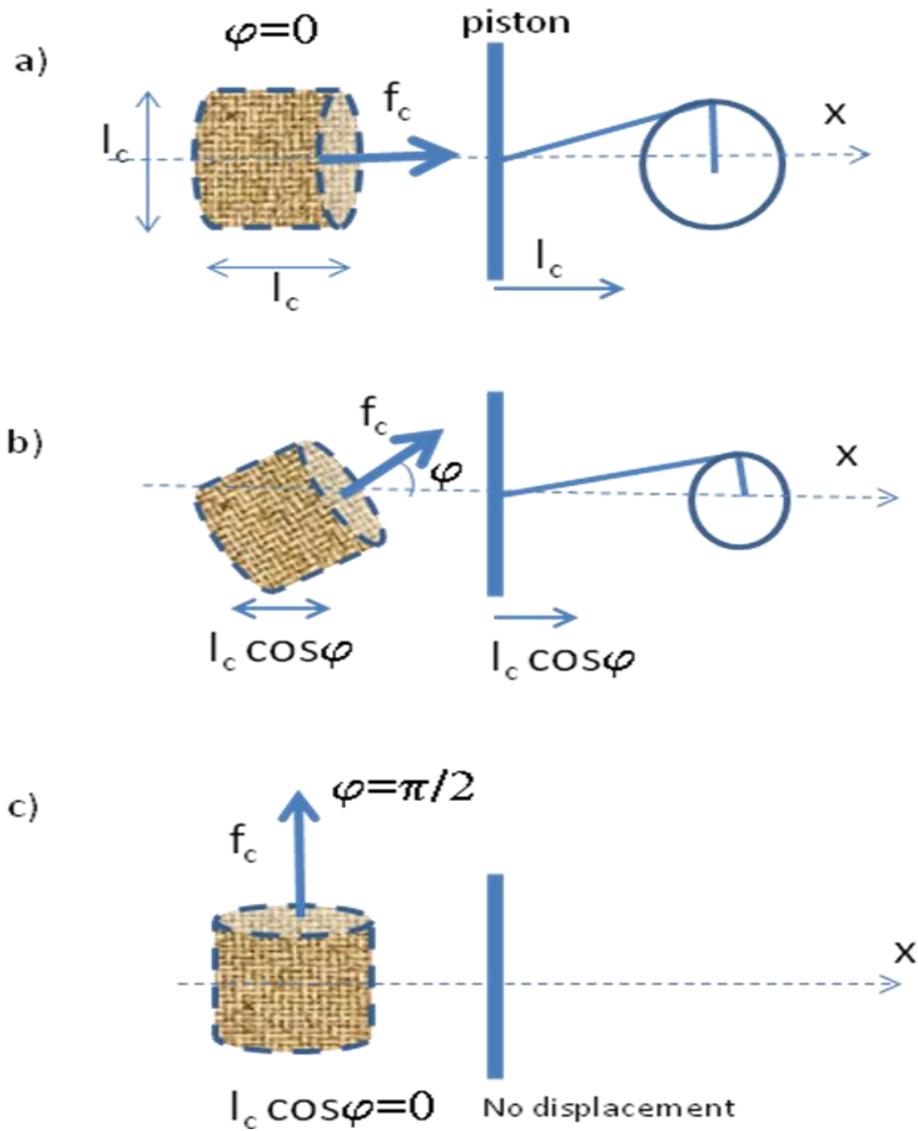
# Modèle granulaire ( et quantique?) de l'énergie





$$\theta = \frac{N_x}{N_x + N_z}$$

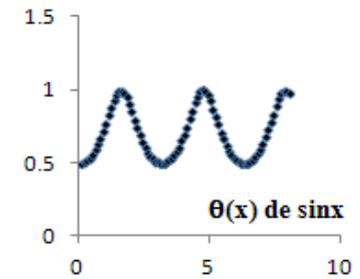
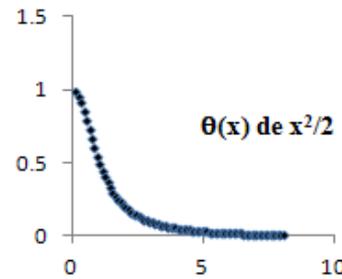
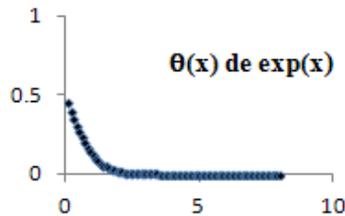
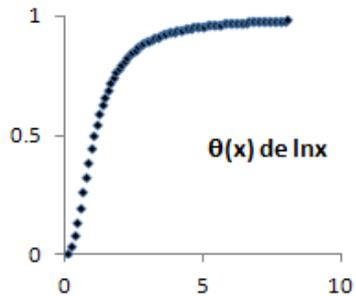
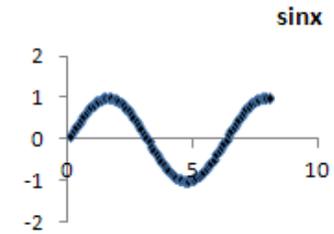
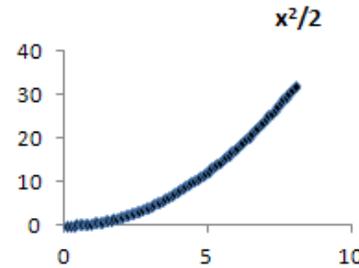
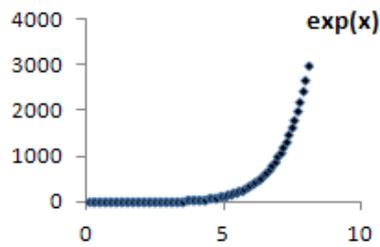
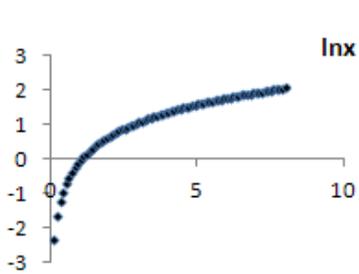
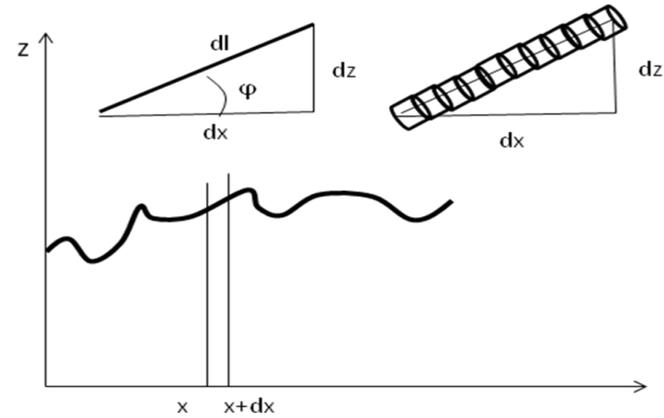




Angle entropique: qualité de l'énergie

# ENTROPIE et EXERGIE D'UNE COURBE

$$\theta(x) = \frac{1}{1 + z'(x)^2}$$



## CONCLUSION

**Pourquoi l'exergie ( mais plutôt l'ENTROPIE en fait...) sera la quantité physique du 21<sup>e</sup> siècle?**

17<sup>e</sup> siècle: VITESSE- ACCELERATION

18<sup>e</sup> siècle: FORCE

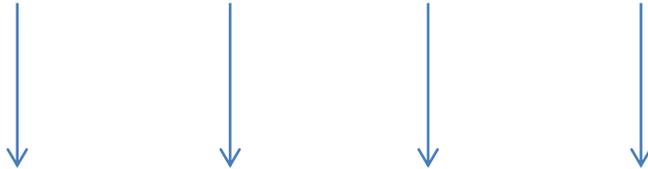
19<sup>e</sup> siècle: ENERGIE ( dispersion: entropie)

20<sup>e</sup> siècle: ACTION (mécanique quantique, nucléaire)

21<sup>e</sup> siècle: ACTION de l'ENERGIE → ENTROPIE (exergie)

## Optimisation par minimisation des pertes exergetiques ( *Pinch analysis* )

### Fluides chauds: ressources



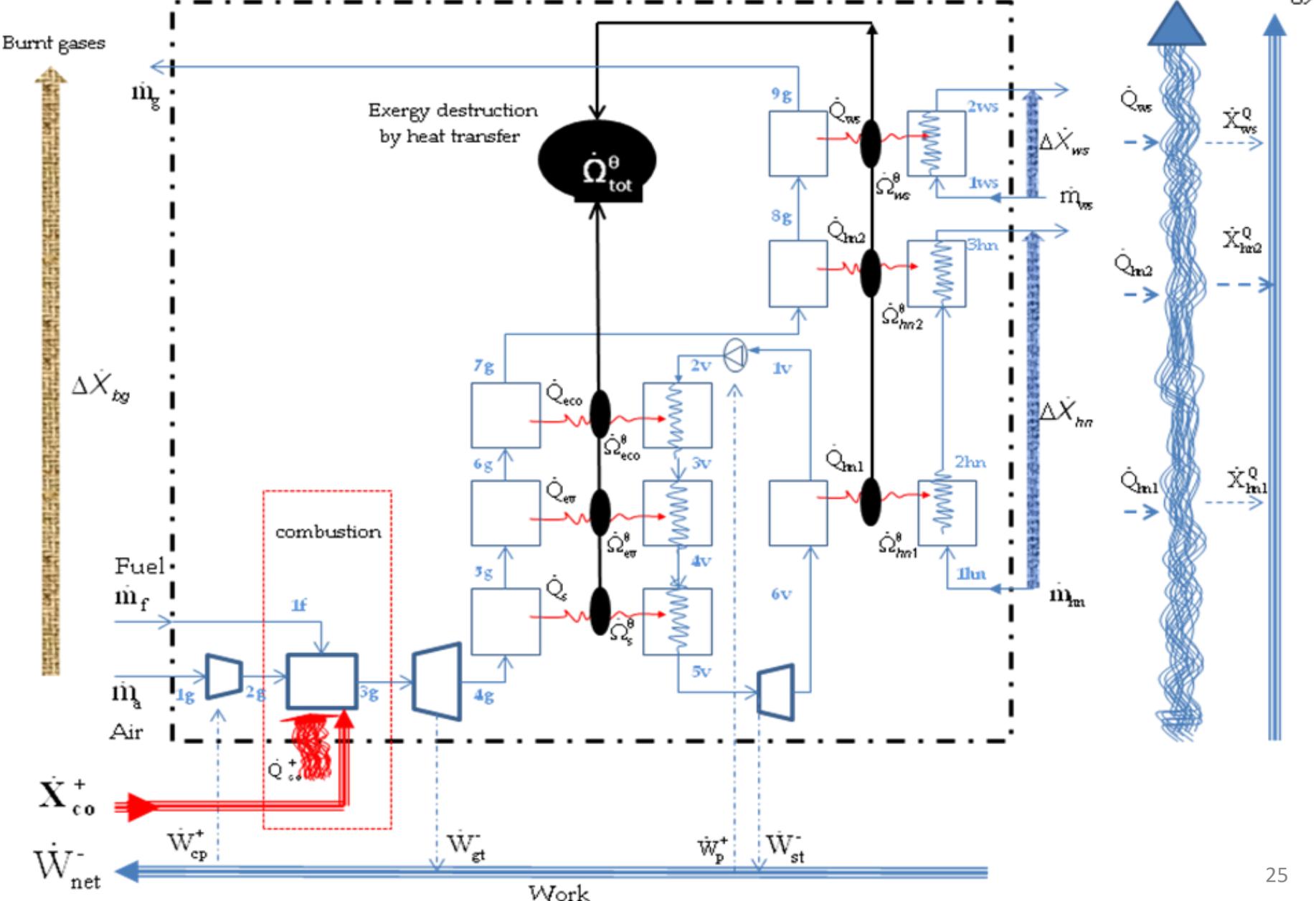
Connexion  
exergo-optimisée

### Fluides froids: besoins

- Optimisation de cycles thermodynamiques complexes
- Aide à la conception et à l'agencement des composants
- Minimisation et distribution des irréversibilités systémiques
- **Intégration thermique en zone urbaine**

**Jusqu'à 30% d'économies en énergie primaire!**

# Cycles combinés-cogénération



# Cycle combiné

