

1ère partie  
Production  
de la vapeur

2ème partie  
Utilisation  
de la vapeur

3ème partie  
Production  
de glace

4ème partie  
Memento  
Technologique

**5ème partie  
vers d'autres  
horizons**



## 5ème Partie "Vers d'autres horizons"

La 5ème partie de la documentation de soleil-vapeur.org regroupe diverses rubriques relatives à l'énergie solaire



Accédez à la  
documentation  
complète de

[www.soleil-vapeur.org](http://www.soleil-vapeur.org)

# L'EFFET D'ÉCHELLE ET SES RAVAGES

"L'effet d'échelle traite des conséquences physiques venant de la modification de la dimension d'un corps ou plus généralement d'une grandeur physique. L'effet d'échelle s'applique aux produits fabriqués par l'homme, mais également au monde vivant et à la physique en général. Quand la modification est une homothétie les proportions sont conservées". Source : Wikipédia 2016

Pour ce qui concerne plus immédiatement notre propos, on constate qu'en matière d'énergie thermique, lorsque les puissances en jeu sont faibles, par exemple de l'ordre de quelques centaines de Watt, certains paramètres s'effondrent par rapport à ce qu'ils étaient dans le cas de puissances plus importantes, c'est le cas notamment du rendement global d'une installation,

Or dans tout le travail de soleil-vapeur il n'est question que d'énergie à petite échelle, qui plus est d'une énergie solaire non stockable, et il est aussi question de vapeur, qui est une énergie fugace.

Un petit temps de réflexion sur la notion d'effet d'échelle n'est pas un luxe, c'est une nécessité afin de ne pas rester naïf ou de voir un projet sombrer dans une "spirale des pertes".

De plus, l'effet d'échelle se conjugue presque toujours avec d'autres phénomènes, ce qui vient encore aggraver la situation : les rendements sont multiplicatifs. C'est une bonne illustration par la physique de l'adage populaire selon lequel "les emm...ents, ça vole en escadrille".

Sommaire :

page

|   |   |
|---|---|
| 2 | Quelques illustrations de l'effet d'échelle   |
| 2 | - Le cube des pertes                          |
| 3 | - La musaraigne et l'éléphant                 |
| 3 | - Ballon de baudruche et ballon publicitaires |
| 4 | - Four banal, moulin banal                    |
| 4 | - l'effet d'échelle en économie               |
| 5 | Effet d'échelle et transport d'énergie        |
| 5 | Effet d'échelle et isolation                  |
| 6 | Effet d'échelle, vapeur, et énergie mécanique |
| 7 | Effet d'échelle et production de froid        |
| 7 | La prise en compte de l'effet d'échelle       |
| 7 | Conclusion                                    |

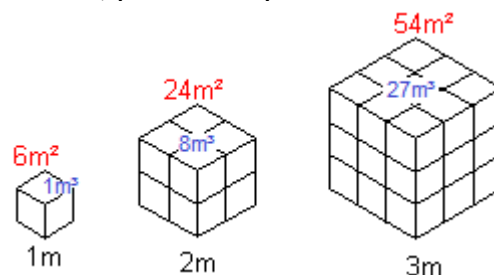
## QUELQUES ILLUSTRATIONS DE L'EFFET D'ÉCHELLE

### Le cube des pertes

Dans son petit ouvrage très pédagogique sur "l'Aventure Nucléaire" ( Collection Explora / La Villette, 1995, page 46), Claude Bienvenu expose le problème du confinement des neutrons à l'intérieur d'un dispositif par une paroi de béton :

"Un cube de 1 m de côté a 6 faces de  $1 \text{ m}^2$  chacune, soit au total  $6 \text{ m}^2$  par  $\text{m}^3$ . Un cube de 2 m de côté a un volume de  $8 \text{ m}^3$  et 6 faces de  $4 \text{ m}^2$ , soit  $24 \text{ m}^2$ , ce qui donne  $3 \text{ m}^2$  par  $\text{m}^3$ . Cela veut dire qu'en doublant la taille de notre cube, nous avons divisé par deux la surface de fuite : plus le système sera gros, moins on perdra de neutrons à la périphérie.

Soit un cube de 1 m de côté protégé par un mur de béton de 3 m d'épaisseur. Il faudra  $342 \text{ m}^3$  de béton. Si le cube a 2 m de côté, son volume est de  $8 \text{ m}^3$ , et il faudra  $504 \text{ m}^3$  de béton pour le protéger, soit  $63 \text{ m}^3$  par  $\text{m}^3$  de réacteur, plus de cinq fois moins."



## **La musaraigne et l'éléphant**

pourquoi la musaraigne est elle si vorace ?

Texte de Roland Lehoucq, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, paru dans les Cahiers du "Monde" N° 20810 Samedi 17 Déc 2011, et reproduit ici

La musaraigne étrusque est le plus petit mammifère du monde: elle mesure environ 4 centimètres de long pour une masse de 1,8 gramme. A l'opposé, le plus gros mammifère terrestre est l'éléphant d'Afrique, long de six mètres pour une masse de 6 tonnes. Remarquons que l'éléphant est 150 fois plus long que la musaraigne.

Si l'on imagine que les proportions des deux animaux sont comparables, il est aussi à peu près 150 fois plus haut et 150 fois plus large. La masse de l'éléphant, proportionnelle à son volume, doit donc être à peu près 150 x 150 x 150 fois plus importante que celle de la musaraigne. Vérifiez, ça marche !

En comparant ces animaux, nous avons cherché quelles sont les conséquences de la modification des dimensions du corps. Poursuivons l'exploration. La musaraigne est un animal très actif qui consomme quotidiennement près du double de sa masse en nourriture, tandis que la ration de l'éléphant ne représente que 5 % de la masse (soit tout de même 300 kg !). Pour comprendre cette différence, il faut réaliser que les animaux à sang chaud se nourrissent d'abord pour compenser leurs pertes thermiques vers le milieu ambiant, généralement plus froid. Ces pertes se faisant par la surface, elles sont proportionnelles à l'aire du corps. L'éléphant perd donc plus d'énergie que la musaraigne, environ 150 x 150 fois plus, car l'aire est une quantité à deux dimensions.

### **Rapport surface-volume**

D'autre part, l'énergie nécessaire à maintenir la température est produite par une activité métabolique qui occupe le volume du corps, 150 x 150 x 150 fois plus important chez l'éléphant que chez la musaraigne. Finalement, le rapport entre la perte d'énergie par la surface et sa production dans le volume est 150 fois plus faible chez l'éléphant que chez la musaraigne.

Le rapport entre surface et volume est défavorable aux animaux de petite taille, qui doivent compenser leur plus grande perte d'énergie par une nourriture proportionnellement plus abondante. [...] Les quelques grammes de la musaraigne représentent sans doute la limite inférieure de masse pour un animal à sang chaud. En deçà, les difficultés pour maintenir une température interne constante seraient probablement trop grandes. A l'autre extrémité, il existe une taille maximale des animaux terrestres au delà de laquelle la masse est si grande que le squelette devient incapable de la supporter: l'animal s'effondre alors sous son propre poids. Il est parfois intéressant d'être plus grand, mais les avantages ne sont pas illimités."

## **ballon de baudruche et ballon publicitaire**

Les ballons de baudruche que l'on gonfle en soufflant dedans ne s'envolent pas dans le ciel, et ne sont qu'un bonheur fort éphémère pour les enfants.

Les ballons à l'aspect brillant et décoré, affichant souvent une tête de personnage de bande dessinée pour enfants, ont déjà beaucoup plus d'allure : ils cherchent à s'envoler, et restent gonflés deux ou trois jours s'ils ne sont pas malmenés. Ces ballons ont deux caractéristiques qui les distinguent fondamentalement des précédents : ils sont gonflés à l'hélium dont la densité est inférieure à celle de l'air, et le matériau de l'enveloppe est plus sophistiqué car l'hélium est plus

fuyard que l'air. Il serait possible d'avoir une enveloppe qui retienne l'hélium pendant un temps beaucoup plus long, mais son épaisseur donc son poids augmenteraient d'autant, ce qui annulerait l'avantage de la légèreté de l'hélium, et le ballon ne s'élèverait pas dans les airs.

Il existe des gros ballons publicitaires que l'on voit parfois dans le ciel, afin d'attirer le chaland vers tel ou tel stand d'une foire-exposition ou autre. Gonflés à l'hélium, ils sont capables de rester en l'air pendant plusieurs semaines, leur enveloppe de bonne qualité retient très bien le gaz. Mais ces ballons ont une taille minimum... Les vendeurs d'articles publicitaires professionnels ne vendent que "des ballons de diamètre 1,20 mètre dans le cas d'une utilisation à l'intérieur d'un bâtiment, ou des ballons de 1,60 mètre pour une utilisation en extérieur".

Il existe peut-être un matériau plus léger pour contenir l'hélium, mais le prix serait probablement rédhibitoire

L'effet d'échelle achoppe ici sur un effet de seuil, sur une taille critique, comme celle nécessaire pour démarrer une réaction en chaîne de neutrons, ou pour la survie d'un petit animal à sang chaud.

### **four banal, moulin banal**

La cuisson du pain au four à bois nécessite une installation relativement importante, dont la mise en chauffe nécessite une quantité importante de bois; il est difficile d'imaginer un four servant à cuire un seul pain: il ne serait pas assez grand pour recevoir le fagot nécessaire pour le mettre en chauffe.

Alors qu'il existe maintenant des petites machines à pain électriques, un four à pain à bois de petite taille est une impossibilité. De ce fait, l'investissement relativement important pour construire un four était hors de portée d'un individu, d'où l'équipement collectif du four banal qui appartenait au seigneur, détenteur en outre du pouvoir.

Le raisonnement est identique concernant le moulin banal, hors de portée d'un individu isolé. Mais si l'on se contente de concasser au lieu de moudre, il suffit de disposer d'un pilon dont l'investissement reste à portée d'un individu.

Four banal et moulin banal sont de bons exemples de la relation entre l'état de la technique et les structures sociales. Concernant un cuiseur solaire tel que le cuiseur à caloducs étagés (présenté dans une autre rubrique de la 5ème partie de la documentation de soleil-vapeur.org) il serait tout à fait possible que, compte tenu d'une dimension minimum nécessaire et compte tenu du prix qui en découle, son utilisation soit collective : quel serait alors le modèle ? Une utilisation collective égalitaire ? Une utilisation de type capitaliste, incluant salariat et vente d'énergie ?...

### **L'effet d'échelle en économie**

L'homme du XXIème siècle est culturellement beaucoup plus à l'aise avec la notion d'effet d'échelle en économie que avec la notion d'effet d'échelle en thermique ; c'est pourtant le même processus.

"Une économie d'échelle correspond à la baisse du coût unitaire d'un produit qu'obtient une entreprise en accroissant la quantité de sa production. On parlera ainsi d'économie d'échelle si chaque bien produit coûte moins cher à produire lorsque les quantités produites (économies d'échelle par rapport au coût de production) ou vendues (économies d'échelle par rapport au coût de revient) augmentent." Wikipédia 2016

## **EFFET D'ÉCHELLE ET TRANSPORT D'ÉNERGIE .**

L'effet d'échelle est complètement différent selon le vecteur énergétique utilisé.

**L'eau sous pression** est un excellent vecteur énergétique. Au 19ème siècle, le port de Marseille était parcouru par un réseau hydraulique sous pression qui alimentait les moteurs hydrauliques des grues portuaires. Désormais, **l'huile** a remplacé l'eau -en empruntant même son nom-, par exemple pour les engins de chantier: le conducteur d'engin retrouve à l'extrémité de son godet l'énergie fournie par la pompe hydraulique. Avec de la vapeur un tel dispositif serait difficilement réalisable.

Avec **l'électricité**, il est possible de la transporter en quantités très importantes dans des câbles haute tension, et en quantités infimes dans des petits appareils électroniques; il est possible de la stocker, en quantités certes limitées dans des grosses batteries industrielles, mais aussi en quantités infimes dans des batteries de téléphone. Il y a bien un effet de «perte en ligne», mais c'est transparent pour l'utilisateur final. L'électricité, à laquelle nous sommes tellement accoutumés, ne connaît pas d'effet d'échelle – du moins, de façon significative

Avec **la vapeur**, cette souplesse n'existe pas.

Dans les petites puissances, de l'ordre du kW ou moins comme c'est le cas pour un capteur de 2 m<sup>2</sup>, les possibilités de transport de la vapeur sont quasi nulles, on peut admettre une longueur de tuyau de un mètre ou un un mètre et demi, et au delà la vapeur, «énergie fugace», condense; c'est une perte en ligne dont l'utilisateur final se rend rapidement compte: «ça ne marche pas!». Pertes thermiques et effet d'échelle marchent main dans la main. Alors que pour des puissances plus importantes, il est tout à fait possible de transporter la vapeur sur des dizaines de kilomètres, c'est ce qui se passe dans les réseaux de chaleur urbains, présents dans de nombreuses grandes villes de par le monde dont Paris avec la CPCU qui chauffe des centaines de milliers de logements, et sur ces réseaux sont parfois installés des dispositifs de stockage de chaleur

## **EFFET D'ÉCHELLE ET ISOLATION**

L'isolation d'un câble électrique en cuivre est «parfaite»: en posant la main sur le câble, on ne ressent aucun choc électrique.

Dans le cas d'une canalisation de vapeur, c'est beaucoup moins simple. Une isolation atténue les pertes thermiques, mais elle n'est jamais parfaite, et plus la canalisation est de faible diamètre, plus l'isolation est imparfaite: une isolation épaisse transmet la chaleur au milieu ambiant sur une plus grande surface, et malgré un niveau de température plus faible à la surface de l'isolant, les déperditions sont globalement importantes.

Il est même possible de démontrer que, en dessous d'un certain diamètre critique, il est inutile voir nuisible d'isoler une tuyauterie de vapeur.

## **EFFET D'ÉCHELLE, VAPEUR, ET ÉNERGIE MÉCANIQUE**

La conversion de la vapeur en énergie mécanique fournit hélas l'illustration la plus flagrante des conséquences de l'effet d'échelle.

Les plus gros moteurs au monde sont des moteurs à vapeur, à savoir les turbines des grandes centrales électriques thermiques (nucléaire, à charbon, à fioul ...) qui toutes fonctionnent à la vapeur. Il en est de même pour les grandes centrales solaires thermiques. Mais lorsqu'il s'agit de petites puissances de l'ordre du kW ou de quelques kW, le rendement mécanique s'effondre en raison de l'effet d'échelle et du principe de Carnot. Les 20 ou 30 % alloués par le principe de Carnot se transforment sous l'effet des pertes thermiques en à peine 1%.

Dans le cas de la conversion en énergie mécanique, il y a une confusion fallacieuse avec les autres vecteurs d'énergie. Il est possible de construire un moteur électrique minuscule qui anime les aiguilles d'une montre, ou bien un micro-moteur hydraulique. Mais il n'est pas possible de construire un moteur à vapeur de 1 kW -sauf à accepter un rendement inférieur à 1%. Et dans le cas d'une transformation de vapeur d'origine solaire en énergie mécanique, l'énergie solaire n'y est strictement pour rien. Néanmoins, catégories de pensées oblige, c'est l'énergie solaire qui est mise en cause : «le solaire, ça ne marche pas».

Extrait d'un forum sur thermodynamique.net, 31 Mai 2003 : «j'ai travaillé sur une installation pédagogique qui produit environ 6 kWh, mais avec une turbine lente (3000 tr/mn), alimentée en vapeur surchauffée. Vu le piètre rendement de ce genre d'installation (pas de soutirage, pas de surchauffe, et température d'entrée turbine assez basse) il faut déjà 150 à 200 kW à la chaudière, c'est déjà une installation conséquente (pompe à vide, condenseur...) Cette turbine fonctionne à l'IUT Génie Thermique et Énergie de Longwy (54)»

La litanie est longue des essais décevants et sans suite, que ce soit avec de la vapeur d'eau ou avec un gaz organique: y-a-t-il une installation solaire à vapeur fournissant 10 kW électrique en fonctionnement ? Quand les installations photo-voltaïques atteignent un rendement de 12 à 15 % avec des prix en chute libre, il est inutile de s'obstiner. Ou alors une solution serait de commencer par faire fonctionner un petit moteur avec de la vapeur provenant d'une chaudière électrique ou autre et de mesurer le rendement; cela permettrait de limiter les frais, mais surtout d'éviter de jeter l'opprobre sur l'énergie solaire.

Noter qu'il n'est question ici que de moteur à vapeur, et non pas de moteur à air chaud Stirling ou Ericson, dont les conditions de fonctionnement sont différentes, voir entre autres le moteur Sunpulse 500.

## **EFFET D'ÉCHELLE ET PRODUCTION DE FROID**

Quand il s'agit de produire du froid à partir de la chaleur, on retrouve exactement les mêmes problèmes que lorsqu'il s'agit de produire de l'énergie mécanique à partir de la chaleur: effet d'échelle et principe de Carnot se conjuguent pour aboutir à des résultats décevants. La liste est pourtant longue des tentatives de réfrigérateurs solaires, mais avec de faibles delta de température de l'ordre de 80°C et des installations de petite taille de l'ordre de quelques kg de glace par cycle, les rendements obtenus sont insuffisants au regard des possibilités de la petite réfrigération solaire par compression via l'électricité photo-voltaïque, notamment après la diminution rapide des prix des panneaux photovoltaïques.

Pour la réfrigération solaire thermique, la seule issue possible - s'il y en a une - repose probablement sur des unités d'une capacité de plusieurs centaines de kg par jour, et fonctionnant sous un delta de température élevé.

## **LA PRISE EN COMPTE DE L'EFFET D'ÉCHELLE**

Dans la vie quotidienne, la confrontation directe avec le concept d'effet d'échelle n'est pas courante, elle ne fait pas partie de la culture. Il n'est pas usuel de le quantifier, or la non prise en compte de l'effet d'échelle peut causer l'échec d'un travail sur une petite installation ou sur une maquette de laboratoire.

## **EN CONCLUSION**

L'effet d'échelle n'est pas l'apanage de l'énergie solaire, mais dès qu'il est question d'énergie solaire à petite échelle il faut avoir le réflexe d'en tenir compte.

On peut retenir entre autres que

- "volume est synonyme de puissance, et surfaces synonyme de pertes"
- l'effet d'échelle se conjugue avec de nombreux autres phénomènes, il est très complexe, rarement quantifié en tant que tel, et la plupart du temps complètement négligé par simple ignorance.
- Dans le cas d'installations de cuisson solaire de l'ordre du kW ou moins, il est indispensable d'en tenir compte dès le stade de la conception, afin de ne pas décourager l'utilisateur. Avec un capteur thermique de un quart de mètre carré, il est inutile d'essayer de faire bouillir une tasse de café, alors que avec un miroir de 2 m<sup>2</sup>, il est possible de faire bouillir une demi-douzaine de litres d'eau, et de faire fonctionner un stérilisateur médical de 14 ou 24 litres.
- Il semble préférable d'abandonner tout espoir de conversion de l'énergie solaire thermique en énergie mécanique via la vapeur dans des installations de petite taille de l'ordre de 10 ou 20 kW électriques