

**WORKING PAPERS**

N° 1200

Avril 2021

## L'effet surface/volume et ses limites

Claude Crampes and Michel Moreaux

## **L'effet surface/volume et ses limites**

Claude Crampes<sup>1</sup> et Michel Moreaux<sup>2,3</sup>

Avril 2021

### **Résumé**

En augmentant la taille des équipements de production, de stockage et de transport, les entrepreneurs, privés et publics, veulent tirer avantage d'un accroissement de volume (outputs) proportionnellement supérieur à l'accroissement de surface (inputs). Mais ce gain d'échelle est limité par la résistance des matériaux, l'éloignement des points d'approvisionnement et de desserte, et les risques d'accident, de congestion et de perte de contrôle d'autant plus graves que l'équipement est important. L'article étudie les gains et les coûts induits par l'effet surface/volume dans les grands secteurs industriels.

### **Abstract**

By increasing the size of production, storage and transport equipment, private and public entrepreneurs want to take advantage of an increase in volume (outputs) proportionally greater than the increase in surface (inputs). But the economies of scale are limited by the strength of the materials, the distance to supply and service points, and the risks of accidents, congestion and loss of control, which are all the more serious as the equipment is large. The article studies the gains and costs induced by the surface/volume effect in the main industrial sectors.

**Mots-clés :** économies d'échelle, stockage, transport, risque industriel.

**Codes JEL :** L63, L9, O14, N7.

---

<sup>1</sup> Ecole d'Economie de Toulouse, Université Toulouse Capitole.

<sup>2</sup> Ecole d'Economie de Toulouse, Université Toulouse Capitole.

<sup>3</sup> Cette recherche a bénéficié du programme ANR-17-EUR-0010 (Investissements d'Avenir).

*"La chétive pécure s'enfla si bien qu'elle creva"*

Jean de La Fontaine

La grenouille qui veut se faire aussi grosse que le bœuf

Le gigantisme de nombreuses installations industrielles est parfois attribué à la mégalomanie de ceux qui en commandent la construction. Sans totalement exclure que cette mégalomanie puisse jouer un rôle, il est plus raisonnable de voir dans la grande taille des équipements le jeu d'une loi géométrique simple, l'effet de surface/volume, qui permet de réaliser des économies d'échelle, donc des gains d'efficacité. Après avoir présenté le principe et donné quelques exemples de cette loi, nous montrons comment elle a été utilisée pour gagner en efficacité dans les activités de stockage, de transport, et pour la production d'énergie.

### **1. Le carré et le cube**

Tous les objets matériels possèdent une propriété intrinsèque liant leur volume et leur surface: quand leur taille augmente, le volume augmente plus vite que la surface. Par exemple, le volume d'un cube dont l'arête est  $A$  est égal à  $V = A^3$  alors que sa surface est  $S = 6A^2$ . Donc tout accroissement de l'indice de taille  $A$  réduit le rapport surface/volume puisque celui-ci est  $S/V = 6/A$ . Cette propriété essentielle s'applique à tous les solides bien que suivant des formules plus compliquées que celle du cube. Ainsi, pour une sphère de rayon  $R$ , on a  $V = 4\pi R^3/3$ ,  $S = 4\pi R^2$  et donc  $S/V = 3/R$ . Galilée est le premier à avoir donné une formulation explicite de cette loi, sous une forme légèrement différente: "*...le ratio de deux volumes est plus grand que le ratio de leurs surfaces*" ('Discours concernant deux sciences nouvelles', 1638).

La loi géométrique surface/volume (aussi appelée règle des deux-tiers ou règle du facteur .6) a de multiples applications dans notre vie quotidienne. Quiconque a dû peler des pommes (de terre ou non) sait bien que plus les pommes sont petites plus il faudra enlever de peau pour obtenir le volume de matière comestible désiré. L'opération est donc plus rapide quand on pèle de grosses pommes.

Inversement, les amateurs de pain croustillant achèteront des flûtes et des baguettes plutôt que des pains de campagne. Mais les échanges entre un objet et son environnement se font par la surface de cet objet. Donc, moins le pain est compact, plus vite il séchera. Pour les mêmes raisons les parents incitent leurs enfants à bien mâcher leurs aliments avant de les avaler puisque la salive et les sucs gastriques participeront d'autant plus facilement à la digestion que la nourriture aura été fractionnée.

Il en va de même pour les échanges thermiques. Nous nous recroquevillons quand nous voulons nous protéger du froid et, au contraire, nous nous étirons pour profiter de courants d'air rafraichissants. Plus le corps est gros, plus l'évacuation de la température intérieure est difficile puisque la surface est proportionnellement plus petite. Les éléphants, possèdent de grandes oreilles qui leur servent d'instrument de rafraichissement pour compenser la faible surface relative de leur épiderme. C'est encore la loi surface/volume qui conseille d'étendre le linge que l'on veut faire sécher, et de se frotter les mains sous le séchoir électrique pour étirer la pellicule d'eau. Pour en finir avec ces quelques exemples de la vie quotidienne, notons que les temps de cuisson augmentent plus vite que la taille des viandes et gâteaux mis au four parce que la chaleur se propage à partir de l'enveloppe extérieure de ces aliments, donc par la surface, sauf s'il s'agit d'un four à micro-ondes qui va chauffer les molécules d'eau directement à l'intérieur des aliments.

## **2. Le contenant et le contenu**

La loi des deux tiers trouve une application dans la plupart des secteurs industriels, et même tertiaires. De façon simplifiée, on peut dire que si l'on construit un équipement ou un bâtiment destiné à recevoir des liquides, des gaz ou des solides, vivants ou non, l'activité de production est croissante avec le volume alors que le coût augmente avec les matériaux nécessaires à la construction de l'enveloppe de ce volume, donc avec la surface. Et puisque le ratio  $S/V$  décroît quand la taille augmente, il en va de même du ratio Coût/Production (Moore, 1959). Donc le coût moyen décroît avec la

taille, propriété que les économistes appellent "économies d'échelle". L'effet de surface/volume n'est pas la seule source des économies d'échelle. Standardisation, effets d'apprentissage et progrès technique en sont aussi de puissants moteurs (Scherer, 1970; Thompson, 2001). Mais il a joué, et continue de jouer grâce aux progrès réalisés en résistance des matériaux, un rôle essentiel dans le développement industriel.

Les bâtisseurs d'églises et de cathédrales savaient bien ce qu'il en coûtait d'extraire les blocs de pierre des carrières, les acheminer et les empiler dans le but d'accueillir un grand nombre de fidèles (donc avoir une grande surface au sol) dans le plus grand volume possible destiné à les impressionner. Le changement radical apporté par les voutes à croisées d'ogive de l'architecture gothique a permis d'économiser sur la pierre tout en augmentant les volumes et en laissant la lumière pénétrer dans les édifices religieux. Le même principe, avec des matériaux moins rustiques, préside à la construction de salles de réunion, de sport et de spectacle, d'aéroports et d'amphithéâtres de plus en plus grands.

Pour ce qui est des marchandises, les entrepôts, les silos, les réservoirs de gaz et de pétrole (Haldi et Whitcomb, 1967) et les barrages de retenues hydrauliques (CFBR, 2013) ont aussi évolué vers toujours plus de volume en proportion de la surface. Pour un état donné des techniques, la limite est donnée par les connaissances architecturales et la résistance des matériaux. S'y ajoutent les productions fatales spécifiques à chaque activité. Ainsi dans les silos à grain, les poussières, la fermentation et la hausse de la température par empilement favorisent les explosions. Plus grande est la taille d'un silo, plus forte est l'énergie potentielle qu'il contient, donc plus il est dangereux (Bourcet et al. 2003). Le plus gros silo du monde, au Kansas, fait 785 mètres de long et peut stocker 500 000 tonnes de blé. Le plus haut (118m) est à Zurich et peut stocker 60 000 tonnes de blé. Ces équipements hors norme présentent donc de grands risques et les équipements de sécurité à installer pour le dépoussiérage, la détection

et la prévention par compartimentation constituent un frein à la baisse du coût moyen.

Avec l'exemple des silos, on notera que l'effet de surface/volume est affaibli quand l'équipement ne croît pas de façon proportionnelle dans les trois dimensions. En première approximation, les deux bâtiments évoqués ci-dessus sont des cubes qui ont été étirés, l'un horizontalement, l'autre verticalement. Si nous étirons verticalement un cube d'arête  $A$  pour en faire un parallélépipède à base carrée  $A$  et de hauteur  $h$ , nous obtenons la surface  $S = 2A^2 + 4Ah$  et le volume  $V = A^2h$ . Donc, le ratio surface/volume est  $\frac{S}{V} = \frac{2}{h} + \frac{4}{A}$ . On voit donc que l'accroissement de la taille  $h$  fait décroître le coût moyen de construction moins fortement que si on pouvait augmenter simultanément  $h$  et  $A$ . Il en va de même des pipelines (Levin, 1977).

### 3. Le transport des marchandises

Pour le transport des liquides et des gaz, deux solutions se présentent: les produits sont transportés en continu (pipeline, aqueduc, gazoduc) ou de façon discontinue (pétrolier, camion-citerne, train). Dans les deux cas, l'effet de taille est important, d'abord à cause des économies relatives en matériaux d'enveloppe évoquées précédemment, ensuite à cause des pertes. En effet, une partie de la marchandise expédiée se perd toujours en cours de route, et ces pertes se font évidemment par la surface enveloppante. Ainsi, plus grand est le diamètre d'un aqueduc, plus faibles seront les volumes d'eau perdus relativement à la quantité d'eau acheminée. Ce principe joue aussi pour le transport d'électricité. Il s'agit cette fois de pertes d'énergie par effet Joule (dégagement de chaleur). En augmentant le voltage et la section des câbles, les ingénieurs peuvent réduire ces pertes en ligne.

Dans la course à la dimension, le transport par voie terrestre est pénalisé par la force de gravité et la résistance à l'avancement, ainsi que par la taille des voies ferrées, routes et tunnels. La taille des wagons ne peut excéder en largeur l'écartement des rails et en hauteur celle des lignes électriques d'alimentation ni, dans les deux

dimensions, le gabarit des tunnels ferroviaires car toutes ces installations sont faites pour le très long terme. Par ailleurs les échanges internationaux par voie ferrée sont contraints par des écartements de voie différents, par exemple 1,435 m en France et 1,668 m en Espagne, ce qui oblige soit à des ruptures de charge, soit à l'utilisation de matériel roulant à écartement variable (Commission européenne, 2011), soit à une adaptation aux standards. Ainsi, la compagnie britannique Great Western Railways a fait progressivement passer son écartement de 2,140 m à 1,435m pendant le dernier tiers du XIX<sup>e</sup> siècle. Les pays où l'écartement est plus grand gagnent en volume de matériel roulant mais il faut plus de terrassement et il reste la limite de la résistance du ballast. Par ailleurs, la standardisation des conteneurs a réduit l'avantage relatif des grands écartements de voie puisque le gabarit des conteneurs est donné par la taille des wagons les plus répandus. Les mêmes contraintes de dimension jouent peu ou prou pour le transport par camion.

Le principe d'Archimède vient au secours du transport maritime et c'est dans ce secteur que les effets de la loi surface/volume sont les plus éclatants car les décisions d'aujourd'hui sont moins contraintes par les décisions d'hier que pour le transport terrestre. La course au gigantisme n'y a été freinée que par la taille des canaux (Panama, Suez) et des installations portuaires d'une part, et par les risques de pollution à la suite de naufrages ou de ruptures de coque. Comme on peut le voir avec les porte-conteneurs, il n'y a quasiment pas de limite de dimension, sauf en largeur à cause de la résistance à l'avancement. Les plus récents mesurent 400m de long, 58m de large et peuvent transporter plus de 20 000 conteneurs. Notons cependant qu'il ne suffit pas de respecter les contraintes de gabarit en largeur pour passer sans encombre dans un canal. L'ensablement du porte-conteneurs Ever-Given qui a bloqué le trafic de centaines de bâtiments sur le canal de Suez pendant une semaine en mars 2021 nous rappelle que plus un bateau est long, plus il est difficile à piloter hors de la haute mer.

Les porte-conteneurs sont aussi un bon exemple du coût du compartimentage: une partie du volume (donc de la production) est

occupée par les cloisons des conteneurs, c'est-à-dire de la surface, donc des coûts. Quand il s'agit de transporter une marchandise homogène (du grain, du charbon ou du gravier), il est évidemment plus efficace de le faire dans des vraquiers dont le volume est entièrement occupé par le produit transporté. Les doubles coques augmentent les coûts à la production mais maintiennent les risques, et par conséquent les assurances à souscrire, dans des limites jugées raisonnables, sinon par les défenseurs de l'environnement, du moins par les financiers et les politiques.

L'évolution qui a transformé le pétrolier en supertanker s'est faite en fonction des routes maritimes et de la situation politique dans les régions productrices. Les pétroliers des années 1950 (les Jumbo) jaugeaient 5 000 tonnes, mais il y avait des exceptions telles que l'Ariston (15 000 t) construit pour Onassis en 1938. Dans les années 1960 on allait jusqu'à 79 000 tonnes pour les Panamax et 150 000 t pour les Suezmax, dont le nom indique clairement par quel canal ils passent: contrainte de largeur pour les deux, contrainte de longueur à cause des écluses pour les bateaux passant par Panama. Quand la guerre entre pays arabes et Israël a entraîné la fermeture du canal de Suez (juin 1967), l'approvisionnement de l'Europe en pétrole venant du Moyen Orient s'est trouvé entravé par la nécessité de contourner l'Afrique par le détroit de Bonne Espérance. Mais le gabarit du canal ne contraignant plus la taille des bâtiments, on observa un redémarrage de la course à la taille, jusqu'à 500 000 tonneaux et même des projets à 1 million de tonneaux, qui heureusement ne furent jamais construits car le canal de Suez fut rouvert au trafic le 5 juin 1975 après 8 ans de fermeture.

Lors des catastrophes maritimes, la transformation des  $m^3$  contenus dans les cuves des pétroliers en  $m^2$  de nappes d'hydrocarbures qui vont polluer des kilomètres de littoral nous rappelle à la dure réalité des lois élémentaires de la géométrie et de la physique. La rupture d'une cuve ou de la coque d'un navire transforme (par la force de gravité et une densité du pétrole plus faible que celle de l'eau) le volume en surface, laquelle devient ainsi disproportionnée:



1m<sup>3</sup> n'occupe que 1 m<sup>2</sup> de surface si sa hauteur est de 1m, mais la surface est de 100 m<sup>2</sup> s'il s'agit d'une nappe de 1cm d'épaisseur.

Les méthaniers méritent une mention particulière. Il s'agit de transporter du gaz naturel sous forme liquide à très basse température (-162°C). Grâce à la liquéfaction, dans un volume donné il devient possible de transporter 600 fois plus d'énergie. Le gain est donc colossal pour la partie transport, mais cette activité exige la construction d'une unité de liquéfaction dans le port de départ et d'une unité de regazéification dans le port de destination. Ces opérations sont soumises à des conditions draconiennes de sécurité imposées aux exploitants des méthaniers. Une autre caractéristique importante est que le roulis fait bouger le gaz liquéfié qui frotte contre la paroi des réservoirs, donc l'échauffe et le regazéifie. Dans les premières générations de méthaniers, ce gaz était rejeté dans l'atmosphère ou brûlé par torchère, ce qui augmentait le coût de transport. Aujourd'hui, ce gaz est récupéré : il est utilisé comme carburant pour propulser le bateau. L'expérience accumulée par les industriels dans les processus de liquéfaction, transport et regazéification du gaz naturel devrait faciliter le développement de la filière hydrogène souhaité par les politiques pour compenser l'intermittence des énergies éolienne et solaire.

#### **4. Le transport des passagers**

Les êtres humains sont des marchandises qui exigent un traitement particulier, qu'ils soient immobiles, comme dans une salle de spectacle, ou mobiles dans un avion ou un bateau. L'Histoire a été marquée malheureusement par des épisodes de triste mémoire où une partie de l'espèce humaine s'est considérée comme suffisamment supérieure pour traiter ceux qui ne lui ressemblaient pas comme une marchandise compressible dans des bateaux négriers et dans des wagons de déportation. Il y eut aussi des circonstances exceptionnelles où l'urgence prévalut sur toute autre considération. Le cas le plus connu est l'Opération Salomon qui vit en mai 1991 Israël exfiltrer 14 500 juifs éthiopiens en moins de 36 heures avec des avions

civils et militaires. En un seul vol, un Boeing 747 transporta 1 222 passagers.

En temps de paix, les passagers demandent un minimum de confort (taille des sièges et des couchettes, hublot), ce qui freine la course à la taille. Dans le transport aérien, les constructeurs ont cependant longtemps caressé le rêve de l'avion de 1000 places. Avec une capacité potentielle de 853 passagers en version charter, l'Airbus A380-800 s'en approche, mais on sait que sa construction est aujourd'hui arrêtée. Le peu de succès de l'A380 s'explique par diverses raisons, notamment les coûts additionnels dans les aéroports d'accueil. Il faut de plus grandes salles d'attente, trois passerelles de débarquement au lieu de deux, des pistes plus résistantes, à quoi il faut ajouter des durées d'embarquement et de débarquement, de manutention des bagages, de nettoyage et d'avitaillement qui augmentent plus vite que le nombre de passagers à cause du nombre limité de portes.

Tous ces coûts croissent avec le volume. Donc même si les ingénieurs sont capables de concevoir des moteurs et des ailes pour des avions transportant 1000 passagers, les contraintes au sol sont telles que peu d'aéroports pourraient les accueillir. Ces mêmes problèmes logistiques expliquent la floraison d'hydravions transocéaniques dans les années 1930.

Un autre problème est lié aux facilités d'accès à l'installation : évacuation des passagers en cas d'incident ou d'accident, accès des secours venant de l'extérieur. La réglementation impose qu'un avion puisse être totalement évacué en moins de 90 secondes. Pour son homologation, un A380 avec 853 passagers et 20 membres d'équipage a été évacué en 78 secondes avec un éclairage limité et la moitié des portes condamnées. Il n'en reste pas moins vrai que sauf à augmenter le nombre de portes et donc affaiblir la structure et perdre des sièges, plus la cabine est spacieuse, plus la distance moyenne vers l'extérieur est grande, ce qui freine la course à la dimension. On peut parier que l'arrêt de la production des A380 marque l'interruption pour plusieurs décennies des programmes de construction d'avions géants pour le transport de passagers.

Beaucoup de ces blocages se retrouvent dans les bateaux de croisière. Leur taille a crû de façon colossale au cours des dernières décennies. Nombre de ces villes flottantes ont une jauge brute supérieure à 200 000 tonneaux, mesurent plus de 350 mètres et peuvent embarquer jusqu'à 5000 passagers. Mais les besoins en "relations avec l'extérieur" (avitaillement, embarquement, évacuation) augmentent avec le volume et donc viennent s'ajouter au coût du bateau lui-même. Par ailleurs, il faut compter un membre d'équipage pour trois passagers, et il faut aussi loger et nourrir l'équipage. Ce coût en ressources humaines est évidemment beaucoup moins important dans le transport de marchandises puisque le nombre de membres d'équipage d'un bateau ou d'un avion reste quasiment inchangé quand on change de taille. Il en va de même du transport routier de marchandises: qu'il s'agisse d'une camionnette ou d'un semi-remorque, il faut un conducteur, et probablement bientôt aucun. La même économie en personnel a été observée dans diverses industries, dont la pétrochimie (Lau et Tamura, 1972).

## 5. Thermodynamique

Dans son sens historique, la thermodynamique est la science de la chaleur et des machines thermiques. La dilatation des corps provoquée par la chaleur, en particulier la vaporisation de l'eau, suscite depuis toujours l'intérêt de l'homme qui a cherché à en contrôler les effets. Ici encore on trouve la loi des deux tiers car la production et les échanges thermiques passent par des relations de volume et de surface.

L'invention des machines à vapeur au 18<sup>e</sup> siècle a fait faire un bond dans la puissance potentiellement mobilisable en un point par rapport aux moteurs traditionnels, les moulins à eau et à vent, et les animaux de traction (Wrigley, 2010 ; Smil, 2010 et 2015). En 1824, Sadi Carnot écrivait "*Déjà la machine à feu exploite nos mines, fait mouvoir nos navires, creuse nos ports et nos rivières, forge le fer, façonne les bois, écrase les grains, file et ourdit nos étoffes, transporte les plus pesants fardeaux, etc. ; elle semble devoir un jour servir de moteur universel et obtenir la préférence sur la force des animaux, les chutes*

*d'eau et les courants d'air.*" Il ne pouvait évidemment pas prévoir que l'universalité de ladite machine à feu serait remise en cause deux siècles plus tard pour des raisons environnementales, à l'avantage des chutes d'eau et des courants d'air.

Les contraintes de conception que doivent satisfaire les moteurs dépendent de leur mode de combustion, interne ou externe, et de leur usage, pour le transport ou en usine. Prenons l'exemple de la locomotive à vapeur, qui a été pendant plus d'un siècle l'élément clé de la révolution industrielle. Outre les contraintes de gabarit imposées par les caractéristiques du réseau ferroviaire, la conception du moteur équipant un train à vapeur doit tenir compte d'une série de processus de conversion : i) charbon et air sont d'abord convertis en chaleur dans le foyer dont la surface de grille détermine le débit ; ii) la chaleur des gaz de la combustion produit de la vapeur dans la chaudière et cette vapeur est confinée pour accroître sa pression; iii) l'énergie de la vapeur est convertie en mouvement alternatif dans les cylindres, lequel est transformé en mouvement rotatif par un système bielle-manivelle; iv) la vapeur est dirigée vers la sortie des tubes de la chaudière pour être rejetée dans l'atmosphère mêlée aux gaz de combustion qu'elle entraîne, assurant ainsi un tirage correct dans le foyer. L'énergie de traction retirée de ces conversions successives est au mieux de 15% de l'énergie potentielle du charbon. On comprend que les ingénieurs aient cherché à améliorer ce faible rendement. Par exemple, lors de la phase ii), les pertes d'énergie sont d'autant plus faibles que la surface de contact entre l'eau et les gaz de combustion est grande. Avec des chaudières tubulaires dans lesquelles les gaz transitent via une multitude de tubes plongés dans le volume d'eau, on multiplie les surfaces d'échange de chaleur entre gaz de combustion chauds et eau froide. Autre exemple, dans la phase iii), la conversion est limitée par le diamètre des cylindres et la course des pistons. Alors, pour mieux récupérer l'énergie de la vapeur, on peut fractionner la conversion: la vapeur passe d'abord dans un cylindre à haute pression, puis dans un cylindre à basse pression. De façon générale, le problème est d'éviter que la chaleur produite ne se dissipe de façon improductive dans l'environnement.

Un problème diamétralement opposé se pose aux concepteurs de sites hébergeant de gros systèmes informatiques. Pour que les calculs soient rapides il faut des systèmes compacts mais la chaleur dégagée est plus facile à évacuer s'ils ne le sont pas. La facture d'électricité de ces centres répond à deux besoins: l'un est d'alimenter les ordinateurs pour qu'ils produisent les services attendus, l'autre est d'alimenter les climatiseurs destinés à les refroidir. Une installation typique consiste à souffler de l'air sur la face avant des travées et à aspirer l'air chaud sur leur face arrière. On peut aussi immerger les tours d'ordinateurs dans l'eau ou l'huile, voire les installer à des latitudes où l'air froid est gratuit (Google en Finlande). L'eau des océans intéresse aussi les opérateurs du secteur: Microsoft a fait immerger à 100 mètres de profondeur au large de l'Ecosse un cylindre de 12 mètres de long contenant 864 serveurs. Mais avec ces techniques, on continue à tenter de résoudre un problème de volume par une solution de surface. Lenovo, leader mondial du PC, mise plutôt sur la technique du *liquid cooling*, qui consiste à acheminer du froid au plus près des composants par des tubes d'eau. Quoi qu'il en soit, toutes ces installations sont dans un équilibre énergétique délicat et la course au gigantisme ne va pas toujours de pair avec la satisfaction des règles de sécurité, comme on a pu le voir avec l'incendie d'un des centres de données de l'entreprise OVH en mars 2021 à Strasbourg.

## **6. Agriculture et changement climatique**

Contrairement à l'industrie, on n'observe pas en agriculture de rendements d'échelle (Boussard 1976). La raison essentielle est qu'il s'agit d'une activité de surface, donc échappant à la loi des deux-tiers. En effet, puisque le principal facteur de production est l'énergie solaire, pour augmenter la production à technologie donnée la seule option est d'augmenter la surface cultivée. Notons que la même contrainte s'impose à la production d'électricité par des panneaux photovoltaïques. En revanche, pour les éoliennes on retrouve une loi géométrique du même type que celle de l'effet S/V : le coût de construction augmente avec la longueur des pâles (et la hauteur du mât) mais la puissance augmente avec la surface balayée par les pâles, donc avec le carré de leur longueur.

Depuis le Carbonifère, il y a quelques 350 millions d'années, la dégradation partielle de la matière organique des végétaux poussant à la surface de la Terre et d'autres composés organiques a fini par constituer des réserves souterraines de charbon et de pétrole que les humains ont réussi à exploiter pour amorcer le décollage économique des deux siècles passés. Mais puisque l'activité industrielle consiste à prélever à l'intérieur du volume représenté par la Terre des composés gazeux et de les lâcher dans la couronne atmosphérique dont l'épaisseur est suffisamment faible pour que le résultat ressemble à la transformation du contenu des cuves d'un pétrolier en nappe d'hydrocarbure, il en découle d'importants déséquilibres climatiques. Pour résorber l'excédent du stock de ces gaz à effet de serre que nous rejetons dans l'atmosphère, nous comptons sur la surface des océans et sur la biomasse répartie à la surface de la Terre. Autant dire que le captage naturel, qui avait exigé des millions d'années, aura du mal à compenser les rejets industriels en croissance permanente depuis deux siècles.

## **7. Conclusion**

Historiquement, la première limite à l'accroissement des volumes fut la résistance des matériaux. Comme la grenouille de La Fontaine, les châteaux, églises et greniers voyaient leur enveloppe se déchirer quand leur volume devenait excessif. Puis les ingénieurs proposèrent de nouveaux matériaux plus légers et plus résistants et les architectes de nouvelles méthodes de construction. Une autre limite apparut alors, celle des échanges entre l'intérieur et l'extérieur: les entrées et sorties de produits, d'animaux ou de personnes, la régulation de la température deviennent plus difficiles à gérer puisque la surface de l'enveloppe croît moins vite que le volume qu'elle contient. Il en va de même des échanges d'information. Plus une organisation est grande, plus son interface avec le monde extérieur est éloignée en moyenne des membres composant ladite organisation (Stephan, 1983). Pour les flux d'information, c'est avec le développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) et la création de plateformes de communication

que cette difficulté est partiellement surmontée. Mais les systèmes de gestion de ces TIC exigent eux-mêmes des quantités énormes d'énergie, ce qui pose un nouveau problème de rapport surface/volume pour en évacuer la chaleur.

### **Bibliographie**

Bourcet J., A. Le Berre et H. Legrand (2003), "La réglementation applicable aux silos au titre des installations classées pour la protection de l'environnement", Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, <https://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/034000706.pdf>

Boussard J.M. (1976), "The concept of economies of scale in a multiproduct industry and its implications for the future of agriculture", *European Review of Agricultural Economics*, Volume 3, Issue 1, 1976, Pages 53–70, <https://doi.org/10.1093/erae/3.1.53>

Carnot S. (1824), "Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance", Bachelier, Paris, [http://www.numdam.org/article/ASENS\\_1872\\_2\\_1\\_393\\_0.pdf](http://www.numdam.org/article/ASENS_1872_2_1_393_0.pdf)

CFBR, Comité Français des Barrages et Réservoirs (2013), "L'histoire des barrages" Juin, <https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/histoirebarrages.pdf>

Commission européenne (2011), "Décision du 26 avril 2011 concernant une spécification technique d'interopérabilité relative au sous-système «infrastructure» du système ferroviaire transeuropéen conventionnel", *Journal officiel de l'Union européenne* L 126/53, 14 mai, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011D0275&from=GA>

Haldi J. and D. Whitcomb (1967), "Economies of scale in industrial plants", *Journal of Political Economy*, Vol. 75, No. 4, Part 1 (Aug.), pp. 373-385

Lau L.J. and S. Tamura (1972), "Economies of scale, technical progress, and the non-homothetic Leontief production function: an application to the Japanese petrochemical processing industry", *Journal of Political Economy*,

Vol. 80, No. 6 (Nov. - Dec.), p. 1167-1187.  
<https://www.jstor.org/stable/1830215>

Levin R. C. (1977), "Technical change and optimal scale: some evidence and implications," *Southern Economic Journal*, vol. 44, October, pp. 208-21.  
<https://www.jstor.org/stable/1057575>

Moore F. T. (1959), "Economies of scale: some statistical evidence", *The Quarterly Journal of Economics*, Volume 73, Issue 2, 1 May, Pages 232–245,  
<https://www.jstor.org/stable/1883722>

Scherer F. M. (1970), "Industrial market structure and economic performance", Chicago, Rand McNally & Company.

Smil V. (2010), "Prime movers of globalization. The history and impacts of Diesel engines and gas turbines", Cambridge MA, The MIT Press.

Smil V. (2015), "Power density. A key to understanding energy sources and uses", Cambridge MA, The MIT Press.

Stephan E. (1983), "A research note on deriving the Square-Cube law of formal organizations from the theory of time-minimization", 61 *Social Forces* 847

Thompson P. (2001), "How much did the Liberty shipbuilders learn? New evidence for an old case study", *Journal of Political Economy*, Vol. 29, No. 1, pp.103–137, <http://www.jstor.org/stable/3078527>.

Wrigley E. A. (2010), "Energy and the English industrial revolution", Cambridge, Cambridge University Press.