

## Elaboration d'une structure de collecte des déchets organiques à l'aide de la théorie constructale

Audrey Tanguy, George Al-Maalouf, Mathias Glaus, Valérie Laforest, Robert Hausler

► **To cite this version:**

Audrey Tanguy, George Al-Maalouf, Mathias Glaus, Valérie Laforest, Robert Hausler. Elaboration d'une structure de collecte des déchets organiques à l'aide de la théorie constructale. 4e édition du colloque " Eau, Déchets et Développement Durable ", Jun 2014, Alès, France. 10p., 2014. <emse-01006665>

**HAL Id: emse-01006665**

**<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-01006665>**

Submitted on 17 Jun 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ELABORATION D'UNE STRUCTURE DE COLLECTE DE DECHETS A L'AIDE DE LA THEORIE CONSTRUCTALE

Audrey Tanguy – George Al-Maalouf – Mathias Glaus – Valérie  
Laforest – Robert Hausler

Ecole de Technologie Supérieure, département du génie de la  
construction

1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal (Québec) H3C 1K3, Canada

audrey.tanguy.1@ens.etsmtl.ca

**Résumé :** La gestion des déchets présente des enjeux économiques et environnementaux majeurs pour nos sociétés, et notamment sur la question des transports. Ceux-ci peuvent ainsi représenter jusqu'à 70% des coûts financiers d'un système de gestion (Uson et al., 2013). Des études ont de plus montré que les systèmes en réseau possèdent une plus grande flexibilité face à la variabilité temporelle des flux de déchets (Rojo, 2009). La difficulté réside donc dans l'optimisation de la configuration spatiale de ces réseaux sur le territoire.

La démarche proposée s'appuie sur la loi constructale, énonçant que les réseaux naturels (bronches pulmonaires, bassins versants) dotés d'un degré de liberté jugé suffisant, adoptent une forme qui minimise la résistance des flux qui les traversent

(Bejan et Lorente, 2009). La loi constructale a été appliquée au cas de la collecte de déchets des particuliers vers un site de transbordement. Deux types de collecte ont été comparés: une collecte conventionnelle, avec une capacité des camions fixée, et une collecte "constructale", caractérisée par l'intervention en série de deux types de véhicules, de capacités différentes (degré de liberté). L'analyse a été réalisée sur le critère financier associé au transport des déchets. Les résultats ont montré que la collecte constructale devient, d'un point de vue opérationnel, économiquement plus performante qu'une collecte conventionnelle

Mots-clés : déchets, collecte, loi constructale, réseau

## 1 INTRODUCTION

Il a été estimé que nos sociétés génèrent actuellement près de 1.3 milliards de tonnes de déchets par an au niveau mondial et que ce chiffre devrait augmenter de 1 milliard de tonnes d'ici à 2025 [2012, The World Bank]. La vision des déchets comme des ressources à exploiter devient fondamentale dans la mise en place de solutions de traitement. Dans cette optique, des études ont montré que les réseaux multifilière de gestion, permettant une alimentation en parallèle des technologies, favorisaient la flexibilité du système et pérennisaient la production de services (énergie, matières valorisées) [2009, Rojo].

Or, dans de tels réseaux, la question de l'acheminement des déchets des résidents aux sites de traitement est fondamentale, afin de diminuer les coûts [2013, Uson et al.]. Plusieurs études ont ainsi abordé le problème sous l'angle de l'amélioration de l'existant : l'objectif était de diminuer le temps de collecte en optimisant l'itinéraire des véhicules [2006, Nuortio et al. ; 2009, Tavares et al.]. Aucune étude ne s'est encore intéressée à la géométrie même du réseau, ou comment optimiser et complexifier cette géométrie afin d'améliorer la performance du système.

La théorie constructale permet de prévoir et d'étudier l'émergence des configurations spatiales des réseaux naturels et anthropiques [2006, Bejan et Lorente]. Le principe qui en découle, appelé loi constructale, postule qu'un réseau possédant un degré de liberté jugé suffisant, adopte une forme qui minimise la résistance des flux qui le traversent. Permettant d'expliquer la forme de réseaux naturels tels que les bronches pulmonaires, les neurones et les bassins de rivières, il a été appliqué à une grande variété de problèmes afin d'optimiser la forme et la structure d'échangeurs de chaleur [2006, Zimparov et al.], de réseaux de distribution d'énergie [2009, Bejan et Lorente], de réseaux routiers [2006, Reis] et de réseaux urbains [2009, Bejan et Lorente].

Le principe d'économie d'échelle établit que les coûts de transport par unité de produit sont d'autant plus faibles que les produits sont transportés en masse sur une grande distance [2000, Bejan et al.]. Dans le cas de la collecte des déchets, il est possible de distinguer plusieurs flux de coût différent. Le plus cher est le transport

des déchets par les travailleurs jusqu'au véhicule de collecte. Le moins cher constitue l'acheminement de ces mêmes déchets dans le véhicule jusqu'au centre de transbordement. Le principal objectif de cet article est de montrer qu'une augmentation du degré de liberté du réseau de collecte (avec l'utilisation de deux types de camions au lieu d'un seul) permet de réduire le coût opérationnel total. Une collecte selon le modèle constructal est ainsi comparée avec une collecte conventionnelle. Les capacités des véhicules (tonnes), la densité de population ( $\text{hab}/\text{km}^2$ ), la longueur et largeur des rues sont des caractéristiques importantes de la configuration du réseau mises en évidence par la théorie constructale.

## 2 METHODOLOGIE

La conception d'un réseau de collecte par la théorie constructale a été appliquée au cas de l'acheminement des déchets des lieux d'habitation des ménages jusqu'à un centre de transbordement. L'approche méthodologique se divise en deux étapes : la construction du modèle constructal et sa comparaison avec un modèle de collecte conventionnelle.

### 2.1 CONSTRUCTION DU MODELE DE COLLECTE CONSTRUCTAL

#### 2.1.1 PRINCIPE DE HIERARCHISATION DES FLUX DANS UN RESEAU

La théorie constructale s'appuie sur le principe qu'une facilitation de l'accès de quantités (de matière ou d'énergie) d'un point vers une infinité de points (volume ou surface) est favorisée lorsque des flux de haute et basse résistance sont mis à la disposition des courants qui doivent circuler. L'architecture optimale du réseau est obtenue par une minimisation de sa résistance globale, lorsque les canaux de basse résistance s'organisent selon une structure arborescente, complétée par des petits canaux de haute résistance reliant tous les points du volume ou de la surface au réseau central [2000, Bejan et al.]. Ce principe explique la forme dendritique de certains réseaux naturels, telles que les bronches pulmonaires (figure 1a). La minimisation de la résistance d'un flux, qui a dans un premier temps été appliquée en thermodynamique, a été associée à la maximisation de la performance du réseau dans d'autres domaines, et notamment, à la minimisation du coût dans celui des transports. Dans l'élaboration d'un modèle constructal de transport de produits, générés en tout point d'une surface  $A$ , vers un point  $M$ , [2000, Bejan et al.] ont conservé la structure arborescente des réseaux naturels, chaque branche constituant un mode de transport caractérisé par un coût (ou résistance)  $K_i$  ( $\$/\text{m}^{\cdot}\text{unité}^{-1}$ ),  $i = 0, 1, 2, \dots$  avec  $K_0 > K_1 > K_2 \dots$ . Chaque  $K_i$  est associé à une surface élémentaire  $A_i$ , dont il est possible d'optimiser la forme  $H_i/L_i$  pour un coût  $C_i$  minimal.

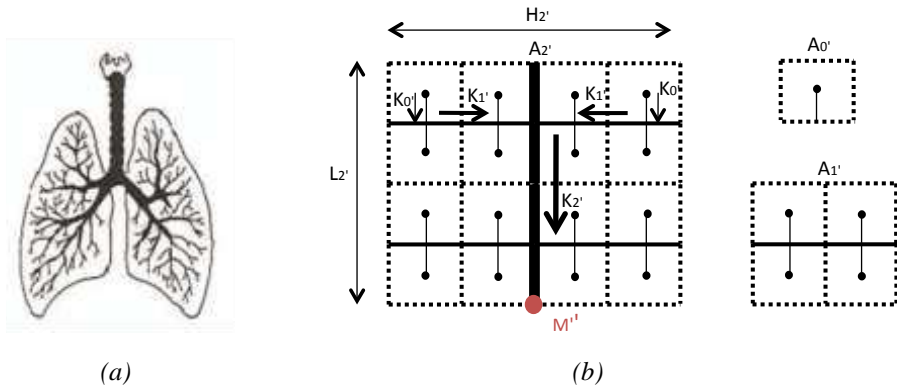


Figure 1: (a) Analogie entre le réseau dendritique des bronches pulmonaires et (b) le modèle constructral de collecte des déchets

Dans le cas de la collecte des déchets, trois niveaux de transport peuvent être considérés (figure 1b). Un premier niveau, caractérisé par le couple  $(A_0, K_0)$ , représente un arrêt au cours duquel des travailleurs transportent les déchets du bord du trottoir à un véhicule de collecte de capacité  $C_1$ . Le deuxième niveau  $(A_1, K_1)$  est le passage du véhicule de collecte dans une rue bordée de logements des deux côtés. A la fin de son parcours, ce véhicule décharge son contenu dans un véhicule de transport de capacité  $C_2 > C_1$  qui constitue le troisième niveau  $(A_2, K_2)$  du modèle. Le véhicule de transport achemine ensuite les déchets vers le centre de transbordement (M). Si  $H_2$  et  $L_2$  sont les dimensions de la zone de collecte, l'objectif du modèle est de déterminer le rapport  $H_2/L_2$  optimal qui minimise le coût total de transport. Ce rapport dépend de plusieurs paramètres tels que la densité de population et les capacités des véhicules.

### 2.2.1 EXPRESSION DU COUT DE COLLECTE

De la même manière que le réseau, le coût de collecte se décompose en trois niveaux. Le premier,  $T_0$ , concerne le coût associé au ramassage des déchets par les travailleurs sur chaque arrêt et s'exprime par la relation [1].

$$T_0 = K_0 4d_0 m_2 \tag{1}$$

où  $d_0$ , fixée, est la distance entre le camion de collecte et les déchets à ramasser et  $m_2$  la masse totale de déchets à collecter sur  $A_2$ . Le deuxième niveau de coût,  $T_1$ , est associé au déplacement du camion de collecte sur  $A_1$ . Sur l'ensemble des  $A_1$ , ce coût est inférieur à  $K_1 (H_2/2) m_2$ , dans le cas du scénario constructral, et inférieur à  $K_1 H_2 m_2$  dans le scénario conventionnel, car la masse réelle transportée est inférieure à  $m_2$ . Elle varie entre zéro et  $m_2$  au fur et à mesure que la collecte se poursuit. La masse moyenne transportée étant égale à  $m_2/2$ , le coût associé est exprimé par [2] pour le scénario constructral et par [3] pour le scénario conventionnel.

$$T_1 = K_1 (H_2/2) (m_2/2) \tag{2}$$

$$T_1 = K_1 H_2 (m_2/2) \tag{3}$$

Enfin, le troisième niveau de coût  $T_2$ , associé au transport des déchets vers M s'exprime par la relation [4].

$$T_2 = K_2 L_2 (m_2/2) \quad [4]$$

Le coût total  $T_{\text{cons}}$  de collecte est la somme des expressions [1], [2] et [4] exprimé par la relation [5].

$$T_{\text{cons}} = m_2 (K_0 4d_0 + K_1 H_2/4 + K_2 L_2/2) \quad [5]$$

pour le scénario constructal tandis que  $T_{\text{conv}}$  est la somme de [1], [3] et [4] exprimé par la relation [6].

$$T_{\text{conv}} = m_2 (K_0 4d_0 + K_1 H_2/2 + K_2 L_2/2) \quad [6]$$

Etant donné que la superficie est fixée, il est possible d'exprimer T par la relation [7]

$$T = m_2 (K_0 4d_0 + K_1 H_2/4 + K_2 A_2/2 H_2) \quad [7]$$

Le rapport géométrique optimal obtenu est caractérisé par la relation [8].

$$(H_2/L_2)_{\text{opt}} = 2 K_2/K_1 \quad [8]$$

La forme optimale de la zone de collecte est ainsi uniquement dépendante des coûts de transport  $K_1$  et  $K_2$  et donc des types de camions utilisés respectivement pour la collecte et le transport des déchets. Deux scénarios de collecte ont été comparés afin d'évaluer l'influence de l'utilisation de deux types camions ( $K_1 > K_2$ ), suggérée par la théorie constructale, sur le coût total de la collecte.

## 2.2 COMPARAISON AVEC UN MODELE DE COLLECTE CONVENTIONNELLE

Les deux scénarios de collecte ont été comparés sur la base d'une même quantité de déchets collectée. Cette quantité a été fixée comme celle nécessaire pour remplir le camion de transport de capacité  $C_2$ . Les coûts d'infrastructure, de maintenance et d'achat des véhicules n'ont pas été pris en compte.

### 2.2.1 SCENARIO DE COLLECTE CONSTRUCTALE

Au premier niveau, les travailleurs transportent à chaque arrêt, sur une distance  $d_0$ ,  $2m_0$  kg de déchets jusqu'au véhicule de collecte de capacité  $C_1$ . Le coût unitaire  $K_0$  associé à ce transport est décrit par la relation [9]

$$K_0 = (2 s_r + s_c + \alpha f)/V_0 2 m_0 \quad [9]$$

où  $s_r$  et  $s_c$  sont respectivement les salaires des ramasseurs et du conducteur (\$/h),  $\alpha$  la consommation du véhicule de capacité  $C_1$  au ralenti (L/h),  $f$  le coût du litre de diesel (\$/L) et  $V_0$  la vitesse des ramasseurs, supposée constante.

Au second niveau, le camion de collecte parcourt une rue en s'arrêtant à chaque arrêt et déchargeant son contenu dans le camion de transport. Le coût unitaire  $K_1$  associé est donné par la relation [10]

$$K_1 = ((2 s_r + s_c)/V_1 + \beta_1 f)/(C_1/2) \quad [10]$$

où  $V_1$  est la vitesse du véhicule et  $\beta_1$  sa consommation (L/km) en mode de collecte.

Le coût unitaire associé au troisième niveau (ou niveau de transport)  $K_2$  se distingue de  $K_1$  par la vitesse, la capacité et la consommation du véhicule et s'exprime comme

$$K_2 = ((2 s_r + s_c)/V_2 + \beta_2 f)/(C_2/2) \quad [11]$$

### 2.2.2 SCENARIO DE COLLECTE CONVENTIONNELLE

Un seul camion de capacité  $C_2$  traverse la zone de collecte et achemine les déchets jusqu'au centre de transbordement une fois plein. En plus du coût associé au ramassage des déchets qui est identique pour les deux scénarios, le scénario conventionnel n'est caractérisé que par un seul niveau de collecte et de transport dont le coût unitaire s'exprime par la relation [12].

$$K'_2 = ((2 s_r + s_c)/V_1 + \beta'_2 f)/(C_2/2) \quad [12]$$

## 3 RESULTATS

Les résultats se divisent en deux parties. La première présente les valeurs de coûts minimaux pour les deux scénarios modélisés, ainsi que celles des paramètres et des variables calculés dans le modèle. La seconde montre l'influence de la variation de deux paramètres, la densité de population et la capacité  $C_1$  du véhicule de collecte, sur l'écart des coûts observés entre les deux scénarios.

### 3.1 VALEURS DES PARAMETRES ET DES VARIABLES DU MODELE

Le tableau 1 présente les valeurs des paramètres utilisés dans le modèle.

TABLEAU 1 : Valeurs des paramètres des deux scénarios modélisés

Paramètres	Description	Unité	Scénario constructal	Scénario conventionnel
$Sc,r$	Salaires des travailleurs	\$/h	35	35
$V_0$	Vitesse des travailleurs	km/h	6	6
$V_1$	Vitesse du véhicule en mode collecte	km/h	15	15
$V_2$	Vitesse du véhicule en mode transport	km/h	50	-
$m_0$	Masse de déchets générés par logement	tonnes	0.035	0.035
$\alpha$	Consommation du véhicule de collecte au ralenti	L/h	2	4

$\beta_1$	Consommation du véhicule en mode collecte	L/km	0.3	0.8
$\beta_2$	Consommation du véhicule en mode transport	L/km	0.38	-
f	Coût du diesel	\$/L	1.35	1.35
$m_2$	Masse de déchets à collecter	tonnes	10	10
$d_0$	Distance parcourue par les ramasseurs	km	0.03	0.03
$C_1$	Capacité du véhicule de collecte	tonnes	1	10
$C_2$	Capacité du véhicule de transport	tonnes	10	10

Le tableau 2 présente les valeurs des  $K_i$ ,  $i=0, 1$  et  $2$ , celle du rapport  $(H_2/L_2)_{opt}$  et le coût minimal pour les deux scénarios, déterminées à partir des paramètres du tableau 1.

TABLEAU 2 : Variables des deux scénarios modélisés

Variables	Unité	Scénario constructal	Scénario conventionnel
$K_0$	\$/tonne.km	261	263
$K_1$	\$/tonne.km	3.2	1.6
$K_2$	\$/tonne.km	0.48	1.6
$(H_2/L_2)_{opt}$	-	0.3	1
$T_{min}$	\$	318	324

Ces résultats permettent de comprendre un point important, mis en évidence par la loi constructale [2000, Bejan et al.]: si un réseau est libre d'évoluer, sa forme optimale sera celle qui permet une répartition des coûts équilibrée entre les différentes branches du réseau. Ainsi, dans le scénario conventionnel, étant donné que  $K_1$  est égal à  $K_2$ , le rapport  $(H_2/L_2)_{opt}$  est égal à 1.



### 3.2 INFLUENCE DE LA DENSITE DE POPULATION ET DE $C_1$

L'étude de l'influence de la densité de population a dans un premier temps été réalisée sur l'écart des coûts entre les deux scénarios (figure 2a). Cette figure, ainsi que la figure 2b, met évidence que le scénario de collecte constructale est plus performant que le scénario de collecte conventionnelle, pour toute densité de population. Ceci s'explique par l'utilisation de camions de collecte de plus faible capacité moins consommateurs de carburant et mieux adaptés à des arrêts fréquents. La figure 2b montre plus particulièrement que l'évolution du rapport  $(T_{\text{cons}}/T_{\text{conv}})_{\text{opt}}$  (toujours inférieur à 1) avec la densité de population dépend de la capacité  $C_1$  du camion de collecte. Pour des petites densités de population, l'utilisation de camions de collecte de 1 tonne engendre un plus grand écart de coûts que celle de camions de 5 tonnes et ce résultat s'inverse dans une moindre mesure lorsque la densité de population augmente (et que le coût total augmente également).

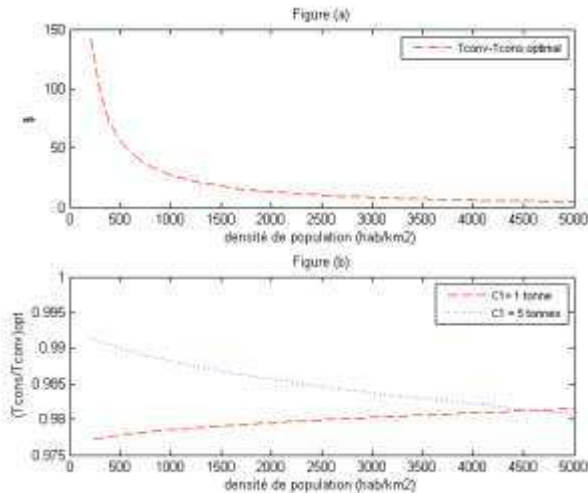


Figure 2: (a) Ecart des coûts de collecte en fonction de la densité de population et (b) rapport des deux coûts de collecte en fonction de la densité de population pour deux valeurs de  $C_1$

Un point important mis en évidence dans la figure 2b est que le coût minimal de la collecte évolue avec le contexte territorial (densité de population) et qu'une configuration (choix de  $C_1$ ) adaptée pour un cas ne l'est pas plus nécessairement lorsque ce contexte change. La hiérarchisation des flux proposée par la théorie constructale permet de rendre le système plus flexible face à ces changements.

## 4 DISCUSSION

L'application de la théorie constructale à un réseau de transport des déchets a montré que la minimisation des coûts peut être réalisée grâce à l'augmentation de la complexité de la structure du système. En accroissant le degré de liberté du réseau, il est ainsi possible d'améliorer sa performance. L'augmentation de la complexité d'un réseau se retrouve aussi bien dans l'utilisation de moyens de transport de coûts différents que dans la recherche de sa géométrie (structure arborescente au lieu d'une structure radiale).

Dans divers domaines (et notamment celui de la thermodynamique), la mise en oeuvre de la loi constructale a aussi montré qu'une minimisation de la résistance d'un réseau était possible par l'optimisation des dimensions de sa structure [2012, Norouzi et al.]. Elle a ici été partiellement réalisée, mais dans l'optique de comparer les deux scénarios de collecte, l'aire de la zone de collecte et la distance  $d_0$  ont été fixées. Or, les valeurs attribuées ne sont pas nécessairement optimales. Un développement possible serait d'intégrer  $d_0$  comme variable du modèle et de ne pas donner une valeur à l'aire de collecte. Il est alors attendu que la minimisation des coûts soit plus importante. Un des objectifs serait en outre de trouver la position optimale du centre de transbordement. L'intérêt d'une telle approche est, que contrairement à l'optimisation d'un réseau existant, elle permet de déterminer les configurations spatiales qui se rapprochent le plus des structures performantes retrouvées dans les systèmes naturels.

## 5 CONCLUSION

Un modèle de collecte des déchets de type constructal, hiérarchisé en trois niveaux correspondant à trois phases de la collecte des déchets, a été comparé avec un modèle plus conventionnel de collecte, constitué de deux niveaux. Sur le critère économique, le modèle constructal s'est révélé plus performant grâce à une organisation des flux qui minimise les consommations de carburant lors de la phase de collecte. Cette étude a en outre permis de montrer qu'en s'appuyant sur des principes qui dirigent les comportements des systèmes naturels (augmentation du degré de liberté de la structure), il est possible de concevoir des réseaux plus performants.

## Bibliographie

- [2000, Bejan et al.] Bejan, Adrian , Viorel Badescu, et Alexis De Vos, 2000, «Constructal theory of economics structure generation in space and time», *Energy conversion & management*, 41, 1429-1451.
- [2009, Bejan et Lorente] Bejan, Adrian, et Sylvie Lorente, 2009, *Constructal human dynamics, security and sustainability*, Amsterdam, IOS Press, 177.
- [2006, Bejan et Lorente] Bejan, Adrian, et Sylvie Lorente, 2006, «Constructal theory of generation of configuration in nature and engineering», *Journal of Applied Physics*, 100, 20-50.
- [2012, Norouzi et al.] Norouzi, Elnaz, Morteza Mehrgoo, et Majid Amidpour, 2012, «Geometric and thermodynamic optimization of a heat recovery steam generator: a constructal design.» *Journal of heat transfer*, 134, 1-12.
- [2006, Nuortio et al.] Nuortio, Teemu, Jari Kytöjoki, Harri Niska, et Olli Bräysy, 2006, «Improve route planning and scheduling of waste collection and transport.» *Expert systems with applications*, 30, 223-232.
- [2006, Reis] Reis, Antonio Heitor, 2006, «Constructal theory: from engineering to Physics, and how flow systems develop shape and structure.» *Applied mechanics reviews*, 59, 269-282.
- [2009, Rojo] Rojo, Gabriel, 2009, *Elaboration d'une approche intégrée d'aide à la décision visant à soutenir une gestion systémique et évolutive des déchets*. Ecole de Technologie Supérieure , Montréal: PhD.
- [2009, Tavares et al.] Tavares, Gilberto, Zdena Zsigraiova, Viriato Semiao, et Maria de Graça Carvalho, 2009, «Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling.» *Waste Management*, 29, 3, 1176-1185.
- [2012, The World Bank] The World Bank, 2012, *What a waste - A global review of solid waste management*. Rapport, Washington.
- [2013, Uson et al.] Uson, Alfonso A., German Ferreira, David Z. Vasquez, Ignacio Z. Bribian, et Eva L. Sastresa, 2013, «Environmental-benefit analysis of two urban waste collection systems.» *Science of The Total Environment*, 463-464, 72-77.
- [2006, Zimparov et al.] Zimparov, Ventsislav, Alexandre K. da Silva, et Adrian Bejan, 2006, «Constructal tree-shaped parallel flow heat exchangers.» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 23-24, 4558-4566.