# Conception des réseaux par biomimétisme : application au transport des déchets

Mathias Glaus, Mélina Maiorano, Robert Hausler

▶ **To cite this version:**

Mathias Glaus, Mélina Maiorano, Robert Hausler. Conception des réseaux par biomimétisme : application au transport des déchets. Environnement, Ingénierie & Développement, 2012, N°62 - Novembre 2012, pp.16-21. 10.4267/dechets-sciences-techniques.2530 . hal-03171171

**HAL Id: hal-03171171**
**https://hal.science/hal-03171171**

Submitted on 16 Mar 2021

**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.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Conception des réseaux par biomimétisme : application au transport des déchets

**GLAUS Mathias[1], MAIORANO Mélina[1], HAUSLER Robert [1]**

[1] École de technologie supérieure, Montréal, Québec, Canada

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : Mathias.Glaus@etsmtl.ca

## RÉSUMÉ

Appliqué aux flux de déchets pour un parc industriel à Montréal, la démarche s'inspire des structures naturelles afin d'identifier le réseau des échanges de matières entre les différents gisements répartis sur le territoire. Basée sur les propriétés de la moisissure Physarum Polycephalum, la configuration du réseau résultant des essais en laboratoire est comparée à des configurations obtenues par des algorithmes mathématiques : un par simulation de la croissance de l'organisme et deux par des modèles classiques de minimisation des distances. Les résultats montrent que le réseau d'échanges basé sur les lois naturelles (biomimétisme) a des caractéristiques telles que la création de mailles et une diversification des embranchements. Ces caractéristiques, qui impliquent, en autres, un nombre de tronçons et une longueur de réseau (assimilable à des coûts d'investissements) près de deux fois plus grands par rapport aux structures classiques, offrent un niveau de résilience accru aux ruptures des échanges. Cette capacité de résilience montre que plus de 50% des échanges sont maintenus lors d'une succession de ruptures comparativement à moins de 20% pour les configurations classiques. Cette capacité à diversifier les filières d'approvisionnement entre les acteurs favorise ainsi le développement durable d'un tissu industriel structuré au sein d'un territoire.

**Mots clés** : écologie industrielle, biomimétisme, réseau, échange, matières

## *ABSTRACT*

*Applied to waste fluxes in a Montreal industrial park, this approach is inspired by natural structures: its objective is to identify the network of matter exchanges between the different sources distributed on the territory. Based on the properties of the Physarum Polycephalum mold, the network configuration obtained through laboratory tests is compared to the ones recovered by three mathematical algorithms: one by simulating the organism growth and two by classical models of distance minimisation. The results demonstrate that the exchange network based on natural laws (biomimicry) has characteristics such as mesh creation and spur diversification. These characteristics imply among other things a number of stretches and a network length (likened to investment cost) almost twice as large as classical structures. They also offer a stronger resilience to breaks of exchanges: indeed, more than 50% of the exchanges are maintained during a series of breaks, compared to less than 20% for classical configurations. This ability to classify the supply chain between the key players favours the sustainable development of an industrial structure in a territory.*

***Keywords*** *: Industrial Ecology, biomimicry, network, exchange, materials*

## 1. INTRODUCTION

La gestion des déchets reste l'un des enjeux majeurs d'un développement économique et industriel de nos sociétés. Bien que l'ensemble des intervenants entérinent le principe de « déchets d'aujourd'hui, ressources de demain », il apparaît fondamental de développer des solutions basées sur une plus-value de l'exploitation de ces gisements. Dès lors, le problème ne se pose pas en termes de « saine gestion » des déchets qui engendre généralement un coût supplémentaire mais comment assurer l'alimentation des filières de transformation à partir de ces résidus pour favoriser la production de biens et/ou services. Au cours des dernières années, les résultats ont montré qu'une approche multifilières permet d'une part, de répondre aux attentes industrielles (rentabilité, stabilité d'approvisionnement, qualité) et, d'autre part, d'assurer la pérennité du système en regard de la capacité de support de l'environnement (Rojo *et al.,* 2011). Par ailleurs, l'équilibre dynamique du système (variation quantitative et qualitative de l'offre et de la demande) est assuré par l'application des principes thermodynamiques et plus spécifiquement de la loi de conservation de l'énergie (Rojo *et al.,* 2008).

Dans le contexte du développement territorial des parcs industriels écologiques, un des enjeux réside dans l'identification d'un réseau efficace d'échange des flux (matières et/ou énergies) entre les acteurs afin de minimiser les rejets dans l'environnement. Parmi, les approches « classiques », il y a celles qui s'inscrivent dans la théorie des graphes et reposent sur l'identification du réseau de coût minimal qui relie l'ensemble des acteurs d'un territoire. À titre d'exemples, les algorithmes associés à l'identification de l'« arbre couvrant de poids minimal - APM » (Minimum spanning tree) permettent d'identifier le réseau arborescent construit de manière à lier un sommet du graphe à son plus proche voisin (Graham et Pavol, 1985). Par ailleurs, l'algorithme de l'« arbre minimal de Steiner - AMS » (Steiner minimum tree), qui se présente comme une variante de l'APM, permet de façon générale de réduire de 7 à 9% la distance totale en autorisant la création de som-

mets intermédiaires (Robins et Zelikovsky, 2009). Cependant, ces modèles de construction du réseau arborescent reliant l'ensemble des acteurs d'un territoire reposent sur une optimisation intrinsèque du réseau.
La capacité des réseaux à répondre aux variations qui leur sont imposées repose sur une redondance des interconnections pour minimiser les conséquences d'une interruption ou d'une défaillance du service. Ceci dit, le problème réside dans l'identifier de ces interconnections en terme d'efficience du système (qualité du service) en regard des investissements consentis. L'approche proposée repose sur la capacité des systèmes naturels à s'adapter aux changements et se structurer afin répondre efficacement aux besoins de leur évolution. Ainsi, la démarche vise à reproduire (imiter) les stratégies des organismes biologiques dans la conception des réseaux d'échanges des flux au sein des systèmes anthropiques (biomimétisme). Le modèle proposé repose sur le comportement du microorganisme Physarum Polycephalum (moisissures). Cet organisme se caractérise par un mode de développement qui, dans un premier temps, forme des branches (dendrides) dans toutes les directions afin de trouver les sources de nourriture. Dans un deuxième temps, les branches n'ayant trouvé aucune nourriture se rétractent pour rejoindre le « corps ». Lorsque deux ou plusieurs branches lient la même source de nourriture, le tube le plus long tend à disparaître. Ce principe s'applique également aux flux à l'intérieur des tubes où un tube avec un faible flux aura tendance à disparaître (Tero *et al.,*2006). À terme, Physarum Polycephalum forme un réseau qui connecte les différentes sources de nourriture disponibles de manière à réduire les distances parcourues pour s'approvisionner tout en créant des liaisons transversales permettant d'améliorer l'efficacité et la résilience du réseau (Nakagaki *et al.,*2000 ; Nakagaki *et al.,* 2004 ;Tero *et al.,*, 2010).

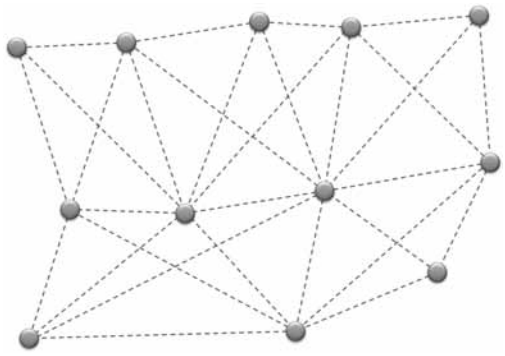
# 2. MÉTHODOLOGIE

La conception du réseau d'échange de flux entre différents points (acteurs) répartis sur un territoire a été développée selon deux approches méthodologiques : (i) expérimentation en laboratoire par croissance de Physarum Polycephalum; (ii) modélisation mathématique basée sur un algorithme de croissance d'organismes vivants.

## 2.1 Modèle expérimental en laboratoire

Basé sur la méthode proposée par Haskins (2008), le protocole expérimental repose, dans un premier temps, sur la préparation du matériel afin de favoriser la croissance de la moisissure Physarum Polycephalum. Après stérilisation de la surface de travail, stérilisation des boîtes de pétris (250 mm x 220 mm), des instruments et de la nourriture (flocons d'avoine) à l'autoclave pour un cycle de 40 minutes à 121 degré Celsius, le substrat est préparé à partir d'agar bactériologique et d'eau distillée pour obtenir une solution à 1,5% de concentration. Sous une hotte biologique, le substrat est déposé dans trois pétris (triplicata). Considérant la répartition sur le territoire d'étude des 12 gisements de déchets (figure 1), un flocon d'avoine (nourriture) est déposé à chacune des 12 sources.

Figure 1 Répartition des 12 sources de déchets/nourritures et du réseau (tissu) potentiel entre celles-ci



Les cultures de Physarum Polycephalum (laboratoire Boréal, Ste-Catherine, Ontario) sont livrées à l'état de plasmode (phase végétative active à la recherche de nourriture). Une partie des cultures est placée au centre de chacun des pétris. Les pétris sont ensuite gardés à l'obscurité à une température entre 22 et 25 degrés Celsius afin de favoriser le développement des dendrides. Le plasmodium se développe et crée son réseau entre 48 et 55 heures.

## 2.2 Modèle mathématique

La modélisation est basée sur l'algorithme développé par Semmler (2011) sur le logiciel CompuCell3D qui permet de simuler le comportement d'organismes et d'y associer des règles comportementales spécifiques à Physarum Polycephalum, telles que :
1. les tubes longs et minces non connectés à une source disparaissent (Nakagaki et al., 2004);
2. la grandeur d'un tube possède un maximum (Tero, 2007);
3. un flux croissant augmente le diamètre du tube (Tero, 2007);
4. les sources de nourriture sont distribuées proportionnellement à la taille des tubes (Nakagaki, et al., 2000)
5. la quantité de nourriture n'affecte que le temps de la simulation (Nakagaki et al., 2004).

Les deux configurations du réseau obtenus expérimentalement et par modélisation, ainsi que les configurations «classiques », soit celles déterminées par l'identification de l'« arbre couvrant de poids minimal » (APM) et l'« arbre minimal de Steiner » (AMS), peuvent être caractérisées par les trois grandeurs suivantes :

→→

- Longueur totale du réseau : $DT = \sum_{i=1}^{n} L_i$
- Distance moyenne des tronçons : $DM = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{N}$
- Degré de séparation : $DS = \frac{\sum_{i=1}^{p} N_i^p}{P}$

$L_i$ : longueur du tronçon i

$N$ : nombre de tronçons

$N_i^p$ : nombre de points intermédiaires pour la paire de points i

$P$ : nombre de paires de points (P=66 pour 12 points)

→→ Par ailleurs, l'évaluation de la résilience (R) des configurations des réseaux est évaluée en définissant aléatoirement une succession de ruptures des tronçons pour chacune des quatre configurations déterminées. À chaque tronçon « coupé », le nombre d'échanges affectés est déterminé afin d'évaluer la capacité des différentes configurations à conserver le niveau de service. Dépendamment du pourcentage d'échanges possibles pour chacune des successions de ruptures, le bénéfice (B) de cette résilience (R) peut être évalué en calculant le rapport B=R/DT, DT correspondant à la distance totale assimilable au coût du réseau (Nakagaki et al., 2004).

## 3. RESULTATS

Les résultats présentent les quatre configurations du réseau pour relier les 12 sources de nourriture/matières spatialement répartis. Par la suite, ces configurations sont comparées selon les critères retenus et leur résilience à des ruptures de tronçons est évaluée.

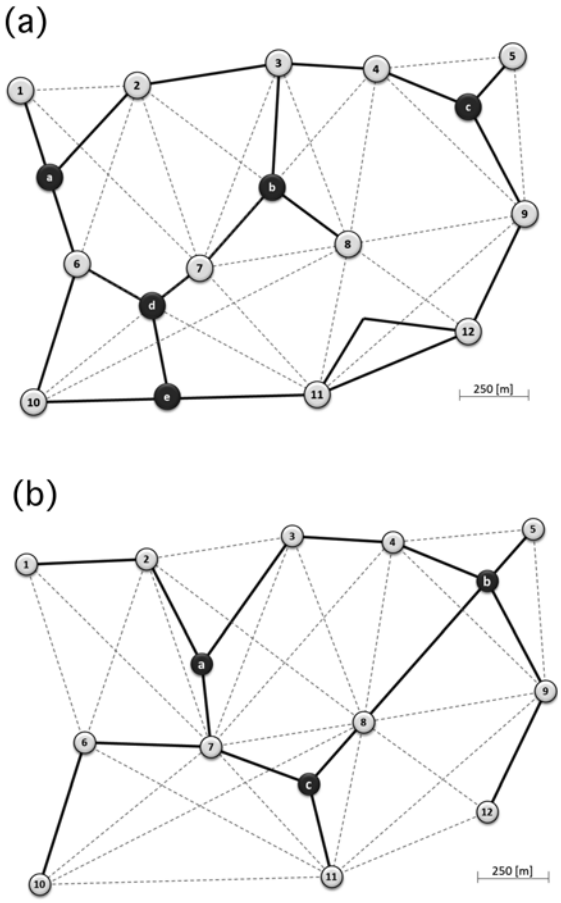
### 3.1 Configurations des réseaux

Le résultat expérimental après 48 heures de développement de Physarum Polycephalum est présenté à la figure 2. La structure montre que les sources de nourriture ont été identifiées et les branches reliant les différentes sources permettent ainsi de maintenir un approvisionnement constant en nourriture.

Figure 2 Structure en réseau de Physarum Polycephalum

L'expérience en laboratoire a été répétée à six reprises et la configuration la plus fréquemment obtenue est présentée à la figure 3-a. Cette configuration « biologique » peut être comparée à celle obtenue par l'algorithme de croissance cellulaire après 2 000 itérations (figure 3-b).

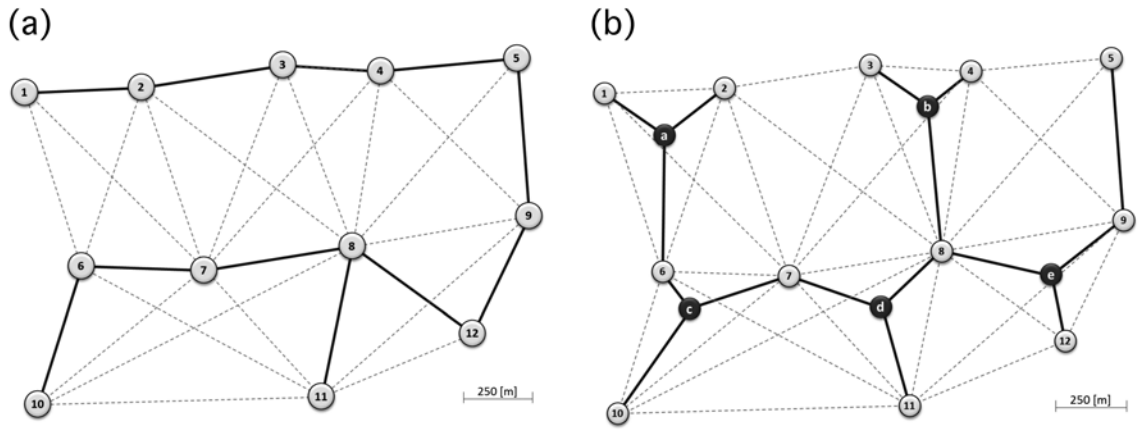
Figure 3 Réseau obtenu (a) par croissance expérimentale de Physarum Polycephalum ; (b) par modélisation associée à l'algorithme de croissance d'organismes cellulaires




Les deux réseaux de la figure 3 présentent des différences dans leur configuration et les connections entre les sources. Différentes valeurs associées aux règles comportementales de l'algorithme ont été testées sans avoir un effet significatif sur la configuration du réseau résultant

de la croissance simulée. Toutefois, il émerge des deux configurations un comportement spécifique aux organismes cellulaires tels que Physarum Polycephalum qui se traduit par la création simultanée d'embranchements et de boucles. Cette propriété observée peut être comparée aux réseaux obtenus par les algorithmes d'« arbre couvrant minimal » (figure 4-a) et d'« arbre minimal de Steiner » (figure 4-b).

Figure 4 Réseau obtenu par les algorithmes (a) « arbre couvrant de poids minimal » - APM; (b) « arbre minimal de Steiner – AMS »




## 3.2 Analyse comparative des configurations des réseaux

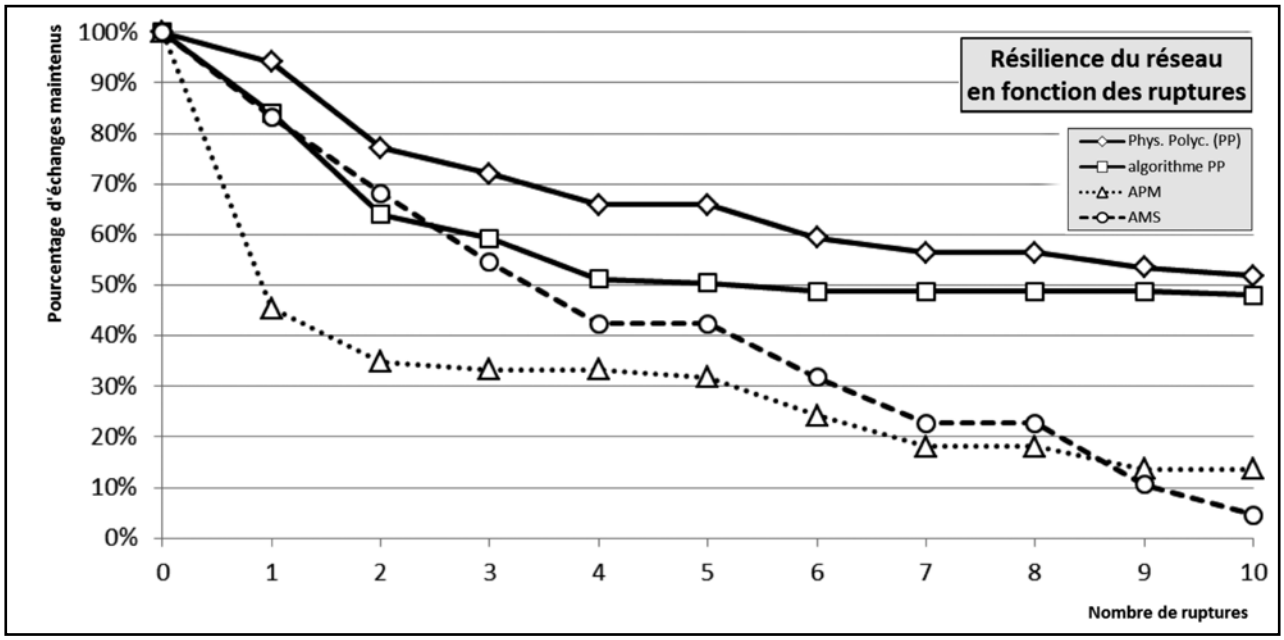
Au-delà des représentations graphiques, les différentes configurations de réseaux peuvent être comparées sur la base des critères présentés au tableau 1. →→

Table 1 Caractéristiques des configurations des quatre réseaux

| Indicateur | Formule | Unité | Physarum Polycephalum | Algorithme | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Phys. Polyc. | APM | AMS |
| Nombre de tronçons | | [-] | 20 | 15 | 11 | 16 |
| Nombre de mailles | | [-] | 4 | 1 | 0 | 0 |
| Nombre d'échanges possibles | | [-] | 372 | 125 | 66 | 66 |
| Longueur totale du réseau | $DT = \sum_{i=1}^{n} L_i$ | [m] | 9 057 | 6 183 | 5 466 | 5 453 |
| Distance moyenne des tronçons | $DM = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{N}$ | [m] | 453 | 412 | 497 | 341 |
| Degré de séparation | $DS = \frac{\sum_{i=1}^{p} N_i^p}{P}$ | [-] | 1,08 | 1,35 | 3,05 | 1,41 |

→→ La configuration « Physarum Polycephalum » se caractérise, comparativement aux autres réseaux, par un nombre de tronçons et une longueur totale significativement plus élevés ainsi que la présence de plusieurs mailles. Par ailleurs, le degré de séparation est plus faible, près de trois fois comparativement à la configuration « APM ». Ces caractéristiques, qui impliquent une longueur totale du réseau plus grande, assimilable à des investissements consentis plus importants, trouvent un intérêt dans le nombre d'échanges théoriques possibles entre les différentes sources qui est cinq plus important comparativement aux deux configurations « classiques » (respectivement 372 et 66). Cette forme de redondance dans la structure peut être appréhendée comme une capacité du réseau à maintenir un niveau de service lorsqu'il y a rupture de tronçons. Cette capacité de résilience peut être évaluée en termes de pourcentage d'échanges encore possibles lorsqu'il y a une succession de ruptures des tronçons dans le réseau (figure 5).

Figure 5 Évaluation de la résilience des différentes configurations




L'expression du degré de résilience en fonction d'une succession de ruptures montre que les deux configurations obtenues à partir du comportement de Physarum Polycephalum (expérimental et mathématique) maintiennent globalement un pourcentage d'échanges plus élevé que les deux configurations « classiques » APM et AMS. Plus spécifiquement, le comportement du réseau établi par biomimétisme a un taux de perte d'échanges qui diminue avec l'accroissement du nombre de ruptures. En considérant les deux configurations APM (classique) et Physarum Polycephalum (biomimétique), l'écart de résilience est la plus faible lorsqu'il y a quatre ruptures, soit respectivement 33% et 66%. Dans ce cas de figure le plus défavorable au modèle naturel, le bénéfice (B) correspondant au ratio R/DT est encore 20% plus élevé pour la configuration biomimétique.

# 4. DISCUSSION

L'intérêt d'une approche biomimétique pour la conception des réseaux repose sur la capacité à identifier « naturellement » une redondance dans la configuration afin de diversifier les stratégies d'approvisionnements entre les points du réseau. Cette redondance basée sur une diversification des filières d'approvisionnement, tout en minimisant les longueurs des branches en créant des embranchements, permet ainsi d'augmenter la résilience du système d'échange des flux en regard des ruptures potentielles des tronçons. Ainsi, la configuration du réseau obtenue est la résultante d'une optimisation de la capacité du système à atteindre sa finalité (approvisionnement) qui diffère significativement de la simple minimisation de la longueur totale des tronçons du réseau.

Cette stratégie dans l'identification du réseau des échanges de flux répond à une vision systémique des activités et trouve un intérêt dans l'organisation d'un parc industriel qui vise à se développer selon les principes d'écologie industrielle. La configuration du réseau permet de mettre en évidence la nécessité de la diversification des échanges de matières et l'identification des relations à privilégier. Dans une perspective de développement, des scénarios peuvent être établis en positionnant de nouvelles entreprises ou des centres de traitement/conditionnement des déchets sur le territoire et en évaluant l'amélioration de la résilience de la structure d'échanges par l'ajout de partenaires.

Dès lors, l'augmentation et la diversification des échanges améliorent la résilience du système aux variations des flux ainsi qu'aux risques techniques ou technologiques et s'inscrit dans une stratégie de symbiose industrielle.
Le positionnement des sources d'approvisionnement a été considéré selon leur disposition au sein du territoire (dimension géographique). Cependant, la spatialité de ces sources et les distances les séparant pourraient être abordées selon une proportionnalité de dépendance les unes par rapport aux autres. Ainsi, une forte dépendance d'approvisionnement d'une entreprise vis-à-vis d'un partenaire se définirait par une distance élevée, exprimant un risque de rupture plus élevé et une résilience plus faible par rapport à une stratégie de diversification.
Finalement, cette stratégie d'intensification des échanges afin de minimiser les pertes dans un système d'activités anthropiques trouve des applications au-delà du développement et de l'aménagement des parcs industriels. Dès lors, la démarche proposée permet d'identifier, par superposition de réseaux supportant des flux distincts (déchets, marchandises, personnes), les synergies potentielles sur les réseaux de transport et ainsi proposer une configuration efficiente à l'échelle du système global d'échanges des flux.

# 5. CONCLUSION

En s'appuyant sur les lois qui dirigent les comportements des systèmes naturels, il est possible de concevoir des structures intrinsèquement efficientes et adaptatives aux changements des flux sur un territoire. Dans une perspective de développement territorial durable, et d'un parc industriel en particulier, l'approche par biomimétisme permet d'évaluer des stratégies de localisation des industries (générateurs ou utilisateurs de matières) afin de garantir un développement cohérent du territoire en regard des indicateurs d'efficacité.

# 6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GRAHAM R. L. et P. HELL. On the History of the Minimum Spanning Tree Problem. Annals of the History of Computing, 1985, vol.7, n°1, pp. 43-57.

HASKINS, E. F., et D. W. DE BASANTA. Methods of Agar Culture of Myxomycetes: An Overview. Revista mexicana de micología, 2008, vol. 27, pp. 1-7.

NAKAGAKI T., H. YAMADA, et A. TOTH. Intelligence: Maze-Solving by an Amoeboid Organism. Nature, 2000, vol. 407, n°6803, p. 470

NAKAGAKI T., R. KOBAYASHI, Y. NISHIURA, et al. Obtaining Multiple Separate Food Sources: Behavioural Intelligence in the Physarum Plasmodium. Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences, 2004, vol. 271, n°1554, pp. 2305-2310

NIIZATO T., T. SHIRAKAWA, et Y.-P. GUNJI. A Model of Network Formation by Physarum Plasmodium: Interplay between Cell Mobility and Morphogenesis. Biosystems, 2010, vol. 100, n°2, pp. 108-112

ROBINS G. et A. ZELIKOVSKY, 2009, Minimum Steiner Tree Construction. In : Alpert C.J., Mehta D.P. and Sapatnekar, S.S. (eds). Handbook of Algorithms for Clsi Physical Design Automation, CRC Press, 2009 pp.

ROJO G., M. GLAUS, R. HAUSLER et al. La gestion territoriale basée sur l'approche systémique de la gestion dynamique des déchets (GDD). Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, vol.38, n°3, pp. 283-292

ROJO G., V. LAFOREST, M. GLAUS et al. La Gestion Dynamique des Déchets (GDD) : un nouveau pas vers l'écologie industrielle. Proceeding Waste Management and the Environment IV. 4th Intern. conf. waste manag. and env., WIT Press Southampton, UK, 2008, pp. 541-550.

SEMMLER N. B. Emergent Networks: A Slime Mold Simulation. Bachelor thesis, University of Amsterdam, 2011, 20p.
TERO A., R. KOBAYASHI et T. NAKAGAKI. Physarum Solver: A Biologically Inspired Method of Road-Network Navigation, Physica A Statistical Mechanics and its Applications, 2006, vol. 363, n°1, pp. 115–119

TERO A., R. KOBAYASHI et T. NAKAGAKI. A Mathematical Model for Adaptive Transport Network in Path Finding by True Slime Mold. Journal of Theoretical Biology, 2007, vol. 244, n°4, pp. 553-564

TERO A, S. TAKAGI, T. SAIGUSA, et al. Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design, Science, 2010, vol.327, n°5964, pp. 439-442