

## L'ARCHICUBE

est la revue semestrielle publiée par l'a-Ulm, Association des anciens élèves, élèves et amis de l'École normale supérieure. Dans son numéro 25 de décembre 2018, elle consacre un dossier de 200 pages à la question de :

### L'encombrement

en faisant, comme toujours, appel à des spécialistes et chercheurs les plus variés, géographes, mathématiciens, physiciens, archéologues, neuroscientifiques, littéraires, philosophes ou biologistes ...

#### La congestion dans les villes: de Haussmann à nos jours

Marc Barthelemy

Directeur de Recherche à l'Institut de Physique Théorique (IPHT-CEA)

Membre associé au Centre d'Analyse et de Mathématique Sociales (CAMS-EHESS)

#### Bref CV

Marc Barthelemy est un ancien élève de l'Ecole (promotion 1987s). En 1992, il est diplômé de l'Université de Paris VI avec une thèse en physique théorique intitulée "Études de quelques marches aléatoires en milieu aléatoire". Après sa thèse, Marc Barthelemy s'est concentré sur les systèmes désordonnés et leurs propriétés. En 1999, il a visité le laboratoire de Gene Stanley à l'Université de Boston et a commencé à travailler sur les propriétés des réseaux complexes. Depuis 1992, il occupe un poste au CEA (Saclay) où ses intérêts ont évolué vers des applications de la physique statistique aux systèmes complexes. En particulier, il a travaillé sur les réseaux complexes, l'épidémiologie théorique et plus récemment sur les approches quantitatives des villes.

#### Quelques liens:

Page web: <http://www.quanturb.com>

Page France-Culture: <https://www.franceculture.fr/personne/marc-barthelemy>

# 1. Introduction

Les villes favorisent l'échange d'idées, de biens, la spécialisation des activités, mais reposent sur la concentration d'un grand nombre d'individus dans une région limitée de l'espace. Cette densité de population amène avec elle un nombre d'effets négatifs tels que l'augmentation des prix de l'immobilier ainsi que des problèmes sociaux et environnementaux. En particulier, la forte demande de déplacement pour effectuer le trajet domicile-travail en voiture aux mêmes heures crée des problèmes de congestion des voies de circulation. Ce problème ancien devient de plus en plus important avec la croissance des villes, et le temps passé dans les embouteillages ne cesse d'augmenter dans les grandes villes. On peut espérer que la compréhension théorique de ce phénomène permettra d'identifier les paramètres critiques afin de le contrôler, ou du moins de le limiter.

A cette fin, la disponibilité croissante de données sur les systèmes urbains nous permet enfin d'entrevoir et de renouveler les approches quantitatives des villes. Différents dispositifs à différentes échelles produisent une très grande quantité de données potentiellement utiles pour construire une « nouvelle science des villes » (Batty, 2013; Barthelemy, 2016). En particulier, la révolution de la téléphonie mobile, du GPS, et des puces RFID (acronyme pour "Radio Frequency Identification" et qui décrit des systèmes tels que le pass Navigo à Paris ou Oyster à Londres) a totalement transformé notre vision des systèmes urbains en nous fournissant une image des déplacements en temps réel, à grande échelle, pour un grand nombre d'individus (tout en respectant leur anonymat), mais aussi d'autres informations sur la ville telle que la distribution spatiale des zones d'activités. Pour des échelles de temps plus grandes (de l'ordre de plusieurs siècles), la numérisation de documents historiques telles que les cartes fournit des informations précieuses sur l'évolution de nos sociétés.

Nous allons ici illustrer les recherches de ce type sur deux exemples, en partant du Paris du 19<sup>ème</sup> siècle jusqu'aux zones urbaines actuelles.

## 1. Congestion et travaux d'Hausmann

Nous examinons ici l'évolution du réseau de rues parisiennes pendant le 19<sup>ème</sup> siècle, une période durant laquelle Paris a connu de grandes transformations sous la direction du baron Hausmann. Il serait difficile de décrire en quelques lignes l'importance et l'impact social, politique et urbanistique des travaux de Hausmann, mais nous insistons ici sur le fait que le centre de Paris a jusqu'au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, une structure médiévale composée de nombreuses rues étroites et encombrées, qui engendre des embouteillages et, selon certains contemporains, des problèmes de santé. En 1852, Napoléon III chargea Hausmann de moderniser Paris en construisant des rues plus sûres, de grandes avenues reliées aux nouvelles gares et places centrales (comme la célèbre place de l'Etoile, la place de la Nation et la place du Panthéon), d'améliorer le trafic et surtout la circulation des troupes armées (voir Barthelemy et al 2013 et les références citées pour plus de détails).

En numérisant des cartes historiques du centre de Paris, nous avons reconstruit le système routier détaillé pour six dates différentes : 1789, 1826, 1836, 1888, 1999, 2010. Il est important de noter ici que les cartes historiques disponibles nous permettent de voir le réseau viaire avant les travaux de Hausmann (1789-1836) et aussi après (1888-

2010), ce qui va nous permettre d'étudier quantitativement l'effet de cette opération urbanistique de grande envergure.

De manière peut-être un peu surprenante, les mesures classiques sur ce réseau routier (avec les indicateurs structurels habituels en théorie des graphes tels que le degré moyen, la longueur totale du réseau, etc.) ne révèlent rien d'autre qu'une croissance douce du réseau qui se traduit par une densification des rues. Ce résultat est très surprenant car nous pouvions nous attendre à ce que l'intervention de Haussmann crée une rupture dans la croissance du réseau viaire de Paris et à ce stade, il semble que son rôle se soit bornée à simplement l'accélérer. Afin de comprendre en détail l'effet des travaux de Haussmann sur le réseau viaire il faut faire intervenir une quantité plus subtile : la centralité d'intermédiarité. Cette centralité -- introduite initialement (Freeman, 1977) en sociologie des réseaux pour quantifier le prestige d'un individu -- mesure essentiellement le nombre de fois qu'un nœud donné est utilisé dans les plus courts chemins connectant toutes les paires de nœuds du réseau. Cette centralité est donc une mesure de la contribution d'un nœud dans l'organisation des flux dans le réseau. En particulier les nœuds à très forte centralité représentent les "goulots d'étranglements" de la navigation sur le réseau viaire. Nous montrons dans la figure 1 les nœuds les plus centraux et nous observons que leur distribution spatiale n'est pas stable et évolue dans le temps.

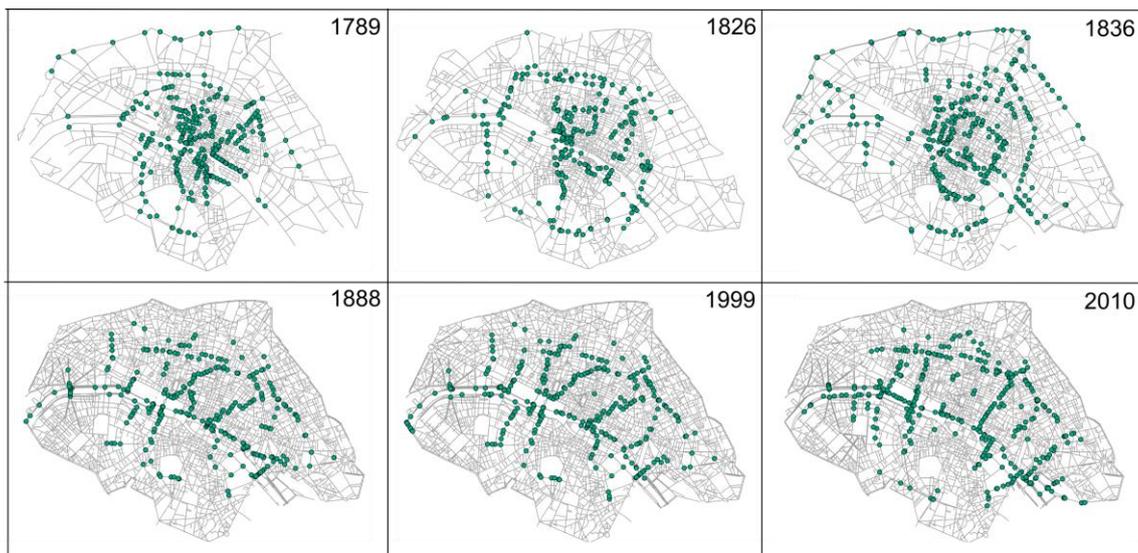


Figure 1. Évolution des nœuds les plus centraux d'une partie de Paris entre 1789 et 2010. L'évolution de la distribution spatiale de la centralité suggère d'importants changements structurels. Figure de Barthelemy et al. (2013).

En particulier, nous observons qu'entre 1836 et 1888, les travaux haussmanniens ont modifié en profondeur la structure spatiale de la centralité, surtout dans la partie centrale de Paris. Après Haussmann (de 1888 à nos jours) nous observons une grande stabilité dans cette partie limitée de Paris. Il est intéressant de noter que la distribution spatiale la centralité fournit aussi des détails sur l'évolution structurelle du réseau viaire parisien pour plusieurs périodes et qui semblent refléter ce qui s'est passé en réalité. Ainsi, dans la période 1789-1826, entre la Révolution française et l'empire napoléonien, les cartes de la figure 1 présentent de grandes variations avec une redistribution des nœuds centraux et qui reflète probablement le fait que de nombreux domaines religieux et aristocratiques ont été vendus et divisés afin de créer de nouvelles maisons et de nouvelles routes, améliorant la congestion à Paris. Au cours de la période 1826-1836, qui correspond à peu près au début de la monarchie de juillet, les cartes suggèrent

une réorganisation importante dans la partie Est de la ville. Cela semble correspondre à la création au cours de cette période du canal Saint-Martin, moyen de transport vital à l'époque.

La conclusion importante est cependant que l'action de Haussmann portait essentiellement sur la manière de se déplacer à Paris, en modifiant en profondeur la distribution spatiale des goulots d'étranglements et donc d'agir sur la congestion. Haussmann a pour cela suivi des principes très simples tels que relier directement les points importants en ignorant la géométrie préexistante. Il en résulte en particulier des modifications importantes de la forme des parcelles et donc de la forme des immeubles (voir par exemple Barthelemy et al., 2013, pour plus de détails). Plus généralement on comprend ici que l'évolution du réseau viaire d'une grande ville résulte probablement de la superposition de processus de croissance locaux et continus et de changements ponctuels opérant à grande échelle spatiale et correspondant à des opérations urbaines de grande ampleur.

## 2. Polycentrisme et congestion dans les villes modernes

### 2.1. Extraction de la distribution spatiale de l'activité à partir de la téléphonie mobile

Les réseaux de téléphonie cellulaire permettent de capturer de grandes quantités de données comportementales humaines mais fournissent également des informations sur la structure des villes et leurs propriétés dynamiques. Nous illustrons ce point avec les données de téléphonie mobile enregistrées sur deux mois et pour 30 aires métropolitaines espagnoles (Louail et al, 2014, 2015). Le point important à comprendre dans cette technologie est que nous pouvons localiser l'antenne la plus proche du lieu où se trouve un téléphone. Dans une zone urbaine, la densité d'antennes est grande et la localisation peut se faire avec une bonne précision au contraire d'une zone rurale où la densité d'antennes est très faible. Il est aussi important de noter que dans toutes ces études, les données sont anonymisées et qu'il est impossible de remonter jusqu'aux individus. Nous pouvons donc mesurer la densité d'utilisateurs dans certaines zones de la ville et en appliquant des filtres tels que la fréquence de visite d'un lieu et la durée de séjour, nous pouvons extraire la densité d'activité pendant la journée dans les villes. Le type de mesures que nous obtenons est illustré dans la figure 2 dans les cas de Vitoria et de Bilbao.

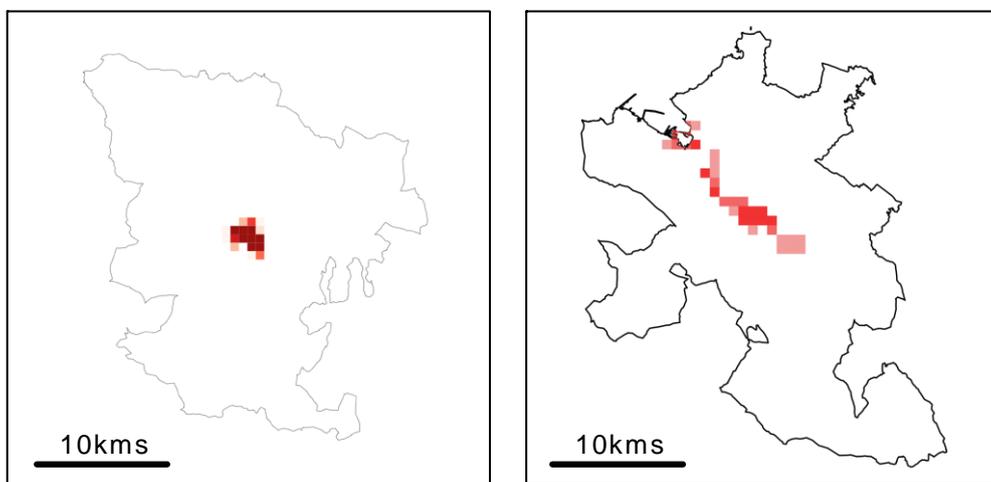


Figure 2. Densité d'utilisateurs de téléphone mobiles pour Vitoria, 250000 habitants (figure de gauche) et Bilbao, 950000 habitants (droite). Plus la couleur est foncée et plus la densité est forte. Figure de Louail et al., 2014.

A l'aide de ces mesures, nous observons en général qu'il n'existe essentiellement que deux types de villes : en premier lieu, des villes généralement petites ayant un centre d'activité unique (figure 1, à gauche) et qui correspondent à l'image classique de la ville monocentrique organisée autour d'un quartier d'affaires central. Deuxièmement, pour les grandes villes, nous observons un schéma plus complexe (figure 1, à droite) avec plus d'un centre d'activité. La structure spatiale de ces centres permet donc de distinguer différentes catégories de villes, de type monocentrique avec une concentration de l'activité, ou bien de type polycentrique pour lequel on observe une répartition en plusieurs centres d'activité. Ces différents résultats pointent vers la possibilité d'une nouvelle classification quantitative des villes en utilisant des données spatio-temporelles à haute résolution.

Afin d'aller plus loin dans l'analyse quantitative de l'organisation spatiale des activités dans les villes, nous déterminons le nombre  $H$  de centres d'activité (pour plus de détail sur cette méthode, voir Louail et al., 2014) et comment il varie avec la population  $P$  de la ville. Nous observons alors un comportement confirmé par des études sur des données d'emploi pour 9000 villes américaines (Louf & Barthelemy, 2013) et qui montre que (i)  $H$  croît avec la population  $P$ , et (ii) que cette croissance est très lente: si on multiplie la population par 2 alors le nombre de centres d'activité est multiplié par un facteur plus petit que 2 (on parle de comportement sous-linéaire). Ce résultat non-trivial va nous servir de guide pour la construction de modèles théoriques.

## 2.2. Approche théorique: la congestion gouverne la forme des villes

La question théorique qui se pose alors est simple: comment expliquer ce comportement observé pour la variation lente du nombre de centres d'activité quand la ville croît ? Et peut-on prédire ce comportement ? Afin de comprendre la structure spatiale des villes et le nombre de centre d'activité, nous devons essentiellement modéliser la manière dont un agent choisit sa résidence et son lieu de travail. Une approche théorique importante pour comprendre ce problème a été proposée par les économistes japonais Fujita et Ogawa en 1982. Dans ce modèle, les agents optimisent leur utilité et les entreprises leur profit. Ainsi, un agent va choisir son lieu de résidence et son lieu de travail tels que son salaire diminué de son loyer et des coûts de transport est maximum. Dans ce modèle, Fujita et Ogawa choisissent d'ignorer les effets de congestion en prenant des coûts de transport proportionnels à la distance entre les lieux de résidence et de travail. Avec ce modèle - très complexe car tout est endogène ici - Fujita et Ogawa ont pu montrer que l'organisation monocentrique avec un centre d'activité unique est instable, en particulier lors que les coûts de transport deviennent trop élevés. Ce formalisme ne permet cependant pas de prédire le nombre de centres d'activité lorsque la population augmente. Même si ce modèle est satisfaisant d'un point de vue intellectuel, tant que ses prédictions ne sont pas en accord avec des mesures empiriques, nous ne pouvons que placer un faible niveau de confiance dans sa capacité à décrire ce qui se passe réellement dans les villes.

Afin d'aller plus loin nous exposons ici brièvement une nouvelle façon de modéliser les villes en intégrant des ingrédients de l'économie urbaine et des outils de la physique statistique (Louf & Barthelemy, 2013, 2014). Un point important ici est que, contrairement à Fujita et Ogawa, ce modèle inclut la congestion. L'effet de la congestion sur le temps passé pour aller d'un point à un autre est central en économie des transports et décrit de manière effective les interactions entre individus. En l'absence de congestion le temps nécessaire pour aller en voiture d'un point à un autre est proportionnel à la distance entre ces points et fait intervenir la vitesse moyenne sur le système routier. En revanche, lorsque le système routier a une capacité finie (en nombre de véhicules par heure par exemple), le temps mis pour parcourir une même distance va dépendre du trafic. Si le trafic est très inférieur à la capacité (situation

"fluide") alors la congestion n'a pas d'effet et la distance et le temps sont reliés simplement à l'aide de la vitesse moyenne. Au contraire, lorsque le trafic est comparable ou supérieur à la capacité du système routier, le temps nécessaire pour parcourir une même distance augmente avec le trafic et traduit l'effet de la congestion (notons qu'il existe plusieurs formes mathématiques pour décrire cet effet, voir par exemple Branston, 1976).

En mettant tous ces ingrédients ensemble, l'étude mathématique (et numérique) permet de prédire que dans le cadre de ce modèle la ville monocentrique est stable jusqu'à un seuil  $P^*$  pour la population et au-dessus duquel un autre centre d'activité devient plus intéressant pour les individus (figure 3).

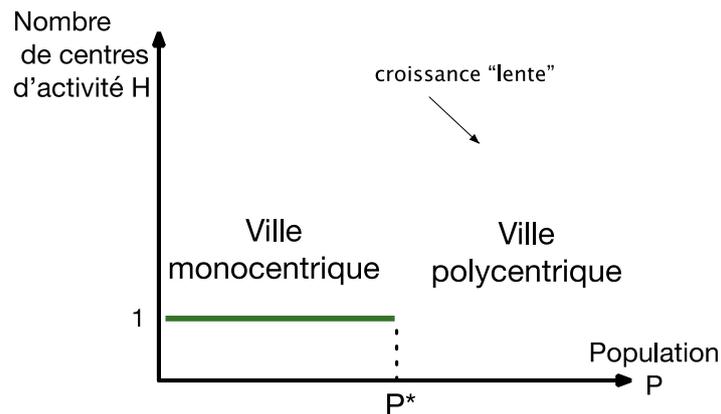


Figure 3. Prédiction du modèle de villes incluant la congestion: Nombre de centres d'activité  $H$  en fonction de la population  $P$ . Pour une population inférieure au seuil ( $P < P^*$ ), le système est monocentrique ( $H = 1$ ) et au-dessus de  $P^*$  la congestion impose la dispersion de l'activité sur plusieurs centres dont le nombre croît lentement avec la population.

Ce découpage spatial de l'activité est ici contrôlé par la congestion: lorsque la ville est suffisamment petite, tous les individus choisissent d'aller au centre le plus attractif (du point de vue du salaire), mais cela augmente le coût de transport (dû à l'effet de congestion). Un autre centre, moins attractif mais avec un trafic plus faible devient alors le lieu de travail le plus intéressant. Nous pouvons estimer ce seuil et nous pouvons montrer que l'augmentation de la population conduit à une augmentation "lente" du nombre de centres d'activités, en accord avec les observations empiriques décrites ci-dessus. La congestion du trafic automobile n'est certainement pas le seul facteur de formation des différents centres d'activités et de la structure polycentrique des grandes villes, mais comme le montre l'accord avec les résultats empiriques, il joue un rôle majeur.

De plus, ce modèle permet d'estimer d'autres quantités relatives à la mobilité telles que le retard passé dans les embouteillages ou le  $\text{CO}_2$  émis par les voitures. Les prédictions pour ces quantités sont en excellent accord avec les mesures pour les villes européennes ou de l'OCDE (Louf & Barthelemy, 2013, 2014). En outre, ce modèle prédit que le  $\text{CO}_2$  émis par les voitures ou le retard total passé dans les embouteillages n'est pas une simple fonction de la densité urbaine. Ceci est en contraste frappant avec le résultat classique de Newman et Kenworthy (1989), montrant que la consommation d'essence dans une ville est une fonction décroissante de la densité de population. Certainement plus de travaux théorique et empirique sont nécessaires ici pour comprendre ce problème.

### 3. Discussion

La disponibilité récente de grandes quantités de données nous permet de révéler des régularités statistiques dans les villes du monde entier. Ces régularités suggèrent l'existence de mécanismes communs qui régissent la formation et l'évolution de ces systèmes, au-delà de leur différences historique, géographique et culturelle. De plus, les hypothèses et modèles traditionnellement proposés en économie urbaine peuvent maintenant être testés et, dans certains cas, un nouveau cadre de modélisation est nécessaire pour comprendre les observations empiriques.

Alors que les économies d'agglomération semblent être le processus fondamental expliquant l'existence des villes et leur résilience spectaculaire, les résultats décrits ici montrent que la congestion est une force motrice qui disperse le modèle monocentrique et force le système urbain dans une organisation polycentrique. L'organisation spatiale de l'activité observée dans les grandes villes peut donc être comprise comme une conséquence de l'interaction entre ces processus concurrents. Même si la polycentricité apparaît ici comme une réaction des systèmes urbains permettant d'abaisser le niveau global de la congestion automobile, ces structures ne sont pas suffisantes pour abaisser à terme le temps total passé dans les embouteillages. L'interpolation naïve des mesures actuelles montre clairement que la voiture individuelle n'est pas une solution viable dans les zones urbaines denses -- même électrique, les temps de transports en voiture seraient bien trop longs. A l'instar de ce qui s'est passé avec Haussmann au 19<sup>ème</sup> siècle à Paris, la congestion va une nouvelle fois modifier en profondeur le fonctionnement de nos sociétés, en forçant l'invention de nouvelles structures urbaines, de nouveaux transports ou bien notre manière de collaborer et de travailler grâce aux technologies de l'information et de communication.

## Références

- Batty M, 2013. The new science of cities. The MIT press. Cambridge, MA (USA).
- Barthelemy M, Bordin P, Berestycki H, Gribaudo M, 2013. Self-organization versus top-down planning in the evolution of a city. *Scientific reports*, 3, 2153.
- Barthelemy M, 2016. The structure and dynamics of cities. Cambridge University Press.
- Branston D, 1976. Link capacity functions: A review. *Transportation Research*, 10(4), 223-236.
- Freeman LC, 1977. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 35-41.
- Fujita M, Ogawa H, 1982. Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. *Regional science and urban economics* 12.2, 161-196.
- Louail T, et al., 2014. From mobile phone data to the spatial structure of cities. *Nature Scientific reports* 4.
- Louail T, et al., 2015. Uncovering the spatial structure of mobility networks. *Nature Communications*, 6:6007.
- Louf R, Barthelemy M, 2013. Modeling the polycentric transition of cities. *Physical Review Letters* 111 (19), 198702.
- Louf R, Barthelemy M, 2014. How congestion shapes cities: from mobility patterns to scaling. *Nature Scientific Reports* 4, 5561.
- Newman PW & Kenworthy JR, 1989. Gasoline consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey. *Journal of the American Planning Association* 55, 2437.

# LE DOSSIER

## L'encombrement

### **Introduction,**

*Véronique Caron, Stéphane Gompertz et Étienne Guyon*

### **ESPACES**

Encombrement au coeur des galaxies,  
Les grains empilés,  
Des embouteillages à toutes les échelles,  
La congestion dans les villes, de Haussmann à nos jours,  
Ville : la fièvre touristique et patrimoniale,  
Désencombrer les transports en commun. Un cas de conscience ?

*Daniel Rouan  
Étienne Guyon  
Cécile Appert  
Marc Barthelemy  
Édith Fagnoni  
Nacima Baron et Pierre Messulam*

### **DECHETS**

Ces encombrants plastiques dans l'océan,  
Nucléaire : des déchets encombrants ?

*Maria Luiza Pedrotti  
Sylvain Granger*

### **LE VIVANT**

De l'encombrement cellulaire aux maladies neurodégénératives,  
Encombrement et croissance de la population,  
La mémoire du futur aux prises avec les mémoires numériques,  
La syllogomanie : de la collection à l'accumulation,

*Antoine Danchin  
Hervé Le Bras  
François Eustache  
Astrid Chevance*

### **MUSES ENCOMBREES**

L'encombrement musical : remarque sur une liberté de notre oreille,  
L'encombrement moderne, ou comment les chaises sont devenues des mots,  
Brouillons embrouillés,  
Proust ou l'art du désencombrement,  
Encombrement : un mot qui n'existe pas, en espagnol,  
Une peinture encombrante : le *Supplice de Marsyas* de Titien,  
Hop, bof, m'enfin ! ou « De l'encombrement en bande dessinée »,

*Quentin Gailhac  
Romain Lancrey-Javal  
Daniel Ferrer  
Thanh-Vân Ton-That  
Roland Béhar  
Guillaume Cassegrain  
Hervé Cronel*

### **SOCIETES**

Les embarras de la philosophie selon Ludwig Wittgenstein,  
L'encombrement de la scène internationale : quel fil d'Ariane pour notre diplomatie ?  
Concurrence et régulation : encombrement ou foisonnement ?  
« Moins mais mieux » : dans la mode, une quête impossible ?

*Christiane Chauviré  
Nicolas Tenzer  
Étienne Chantrel  
Lucas Delattre*

### **STOCKER ET RATIONALISER L'INFORMATION**

Heurs et malheurs des archéologues,  
Archéologie urbaine : les vestiges du passé encombrant-ils nos villes ?  
Les bibliothèques ou l'encombrement comme bienfait,  
La chaîne du livre encombrée par la surproduction,  
Arts et Métiers : rénovation d'un musée de l'innovation technique,  
La mutation de la galerie de zoologie en galerie de l'évolution,  
Toute la mémoire du monde : encombrement informatique ?  
Encombrement numérique,  
*Beware ! The Blob*,  
Le programme « Mémoire du monde » de l'Unesco,

*Guy Lecuyot  
Frédéric Gerber  
Ann Blair  
Steven Bouvier  
Dominique Ferriot  
Michel Van Praët  
Wladimir Mercoureff  
Éric Guichard  
Paul Mathias  
Gérald Grunberg*

---

## **Bulletin de commande du numéro**

NOM Prénom :

Si besoin nom de l'établissement :

N° et rue :

Code postal :

Ville :

Chèque de 20 € (abonnement pour un an, soit 2 numéros)

**ou 12 € (pour le seul numéro 25)**

Prix à fixer pour toute commande dépassant 10 numéros

**à l'ordre de l'A-Ulm et à faire parvenir à l'adresse ci-dessus**