

# Introduction aux réseaux

---

Marc Barthelemy

CEA, Institut de Physique Théorique, Saclay, France

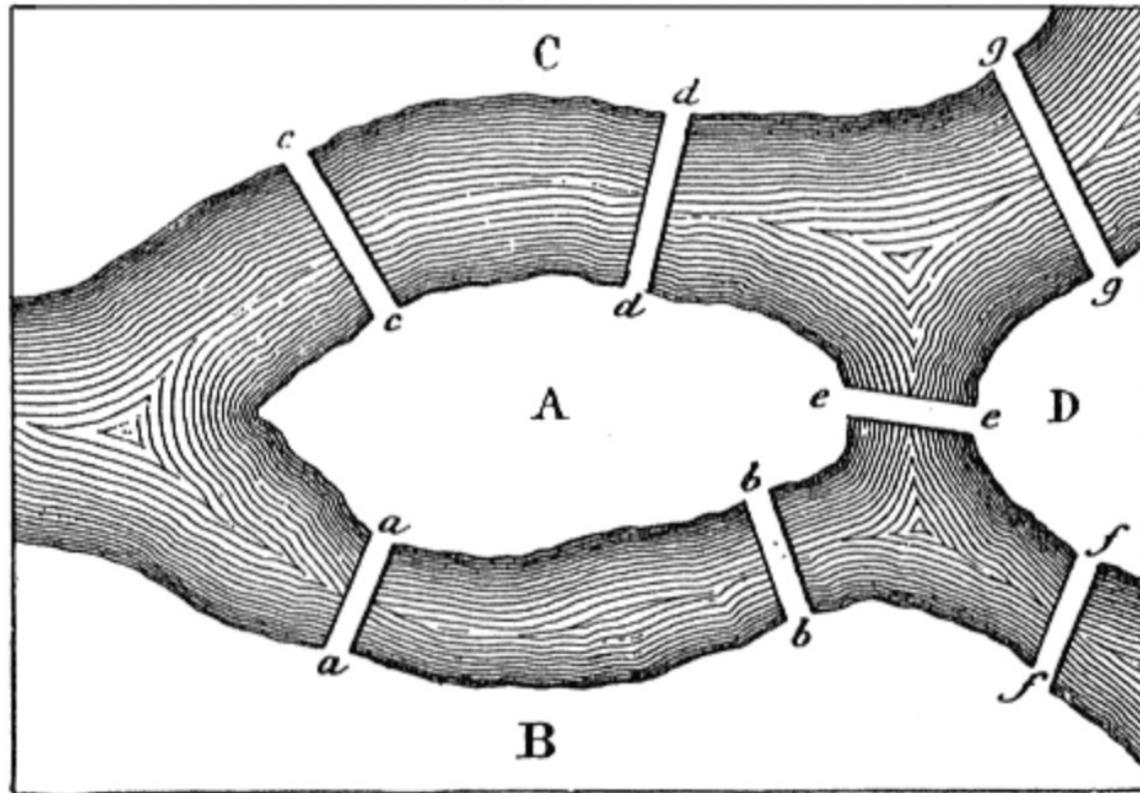
EHESS, Centre d'Analyse et de Mathématiques sociales, Paris, France

`marc.barthelemy@ipht.fr`

`www.quanturb.com`

# Qu'est-ce qu'un réseau (graphe)

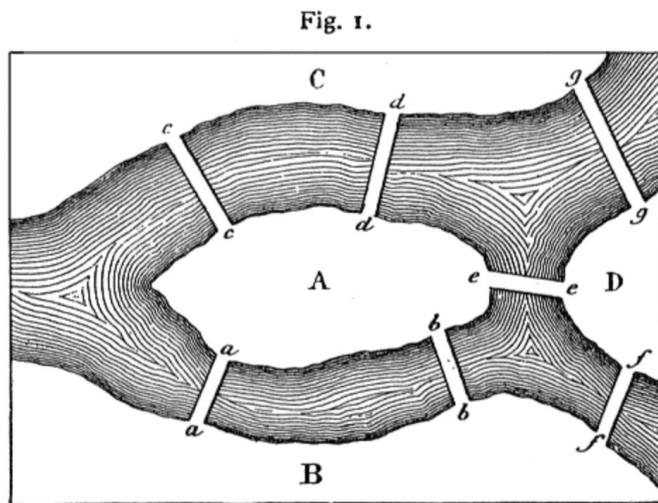
Fig. 1.



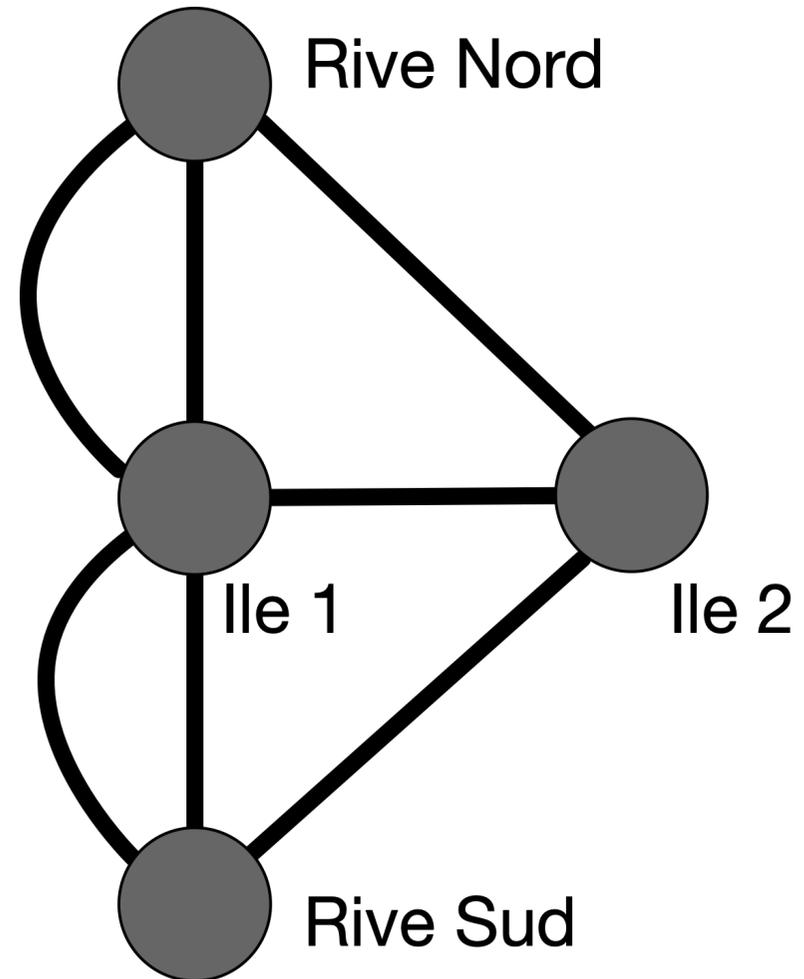
Les ponts de Kœnigsberg en 1759.

Euler - problème des 7 ponts de Königsberg (1736):  
Existe t'il un chemin permettant de revenir à son point de départ en empruntant une seule fois chaque pont de la ville ?

# Qu'est-ce qu'un réseau (graphe)



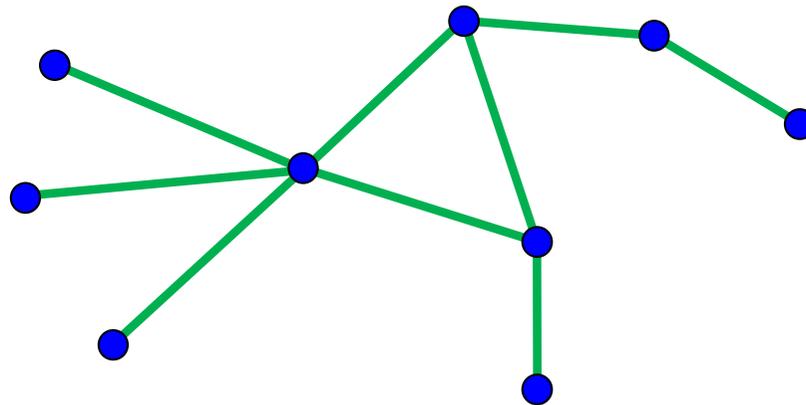
Les ponts de Königsberg en 1759.



Euler: problème des 7 ponts de Königsberg (1736)

# Qu'est-ce qu'un réseau ?

Graphe = réseau = nœuds et des liens

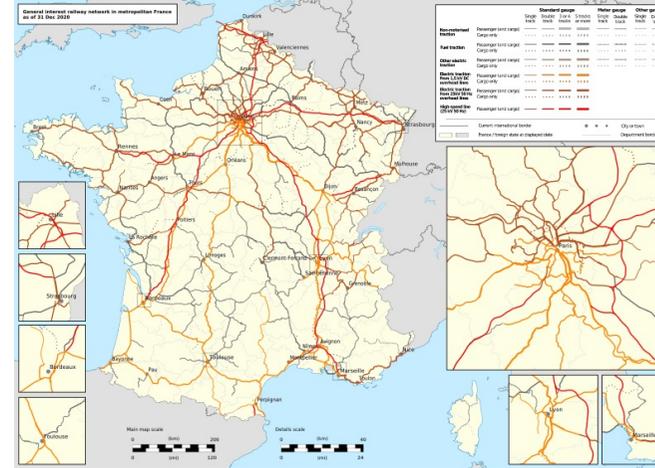


- Représentation abstraite, très générale
- Les liens peuvent être dirigés, valués, etc...
- Peut décrire de nombreux systèmes: biologie, infrastructures, réseaux sociaux, Internet & Web, etc...
- Nombreuses d'applications: transport, réseaux sociaux, épidémies,...

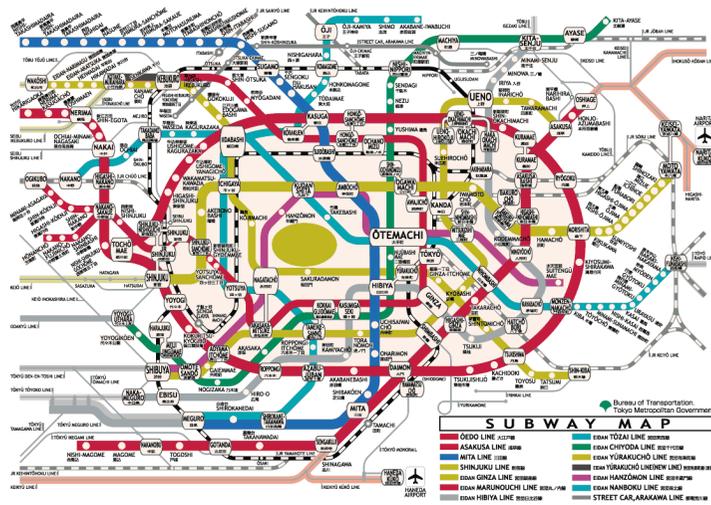
# Réseaux de transport: échelles



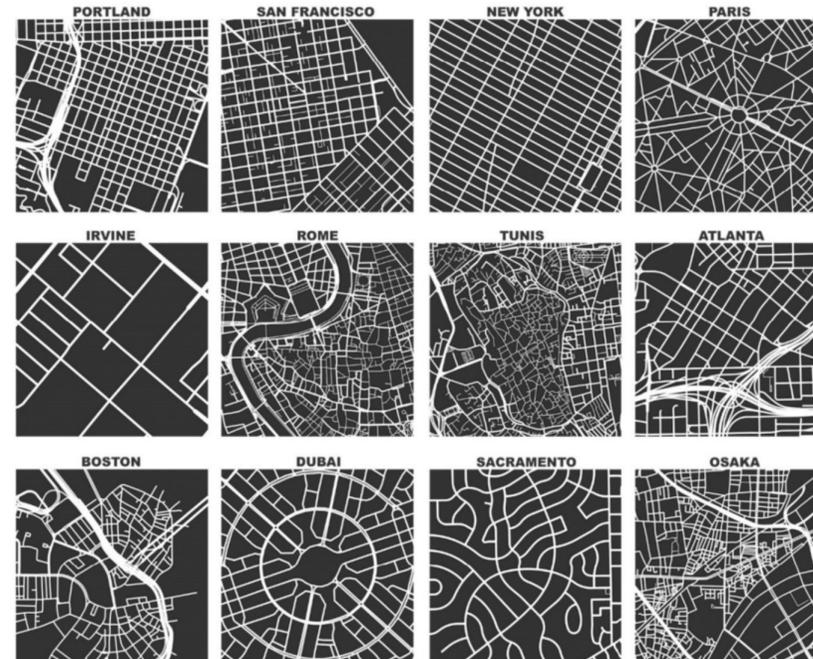
Nœuds: aéroports  
Liens: vols directs



Nœuds: gares  
Liens: rails



Nœuds: stations  
Liens: rails entre 2 stations

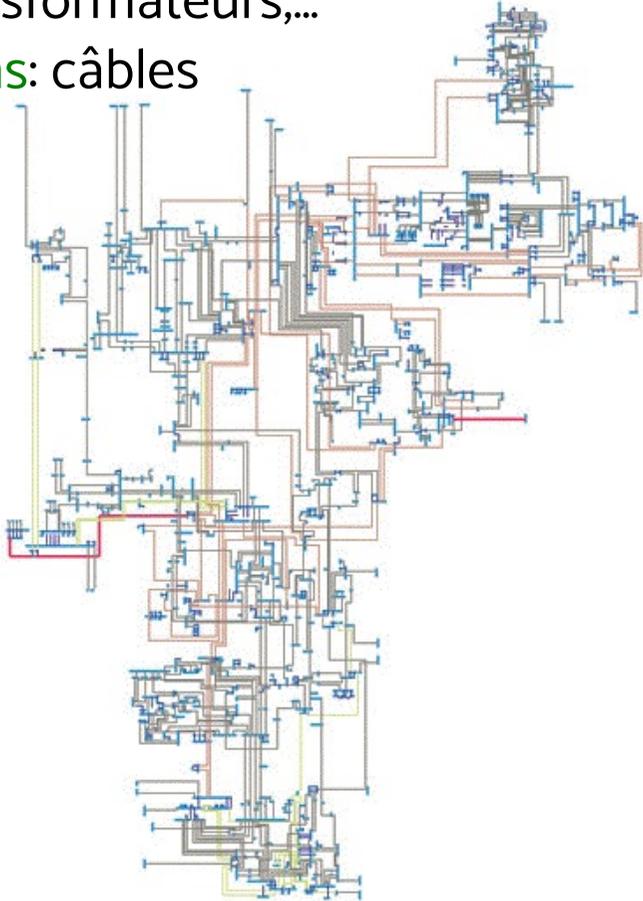


Nœuds: intersections  
Liens: segments de routes

# Electricité et gaz

Nœuds: centrales,  
transformateurs,...

Liens: câbles



New York state power grid



European pipelines

# Que faire avec ces réseaux ?

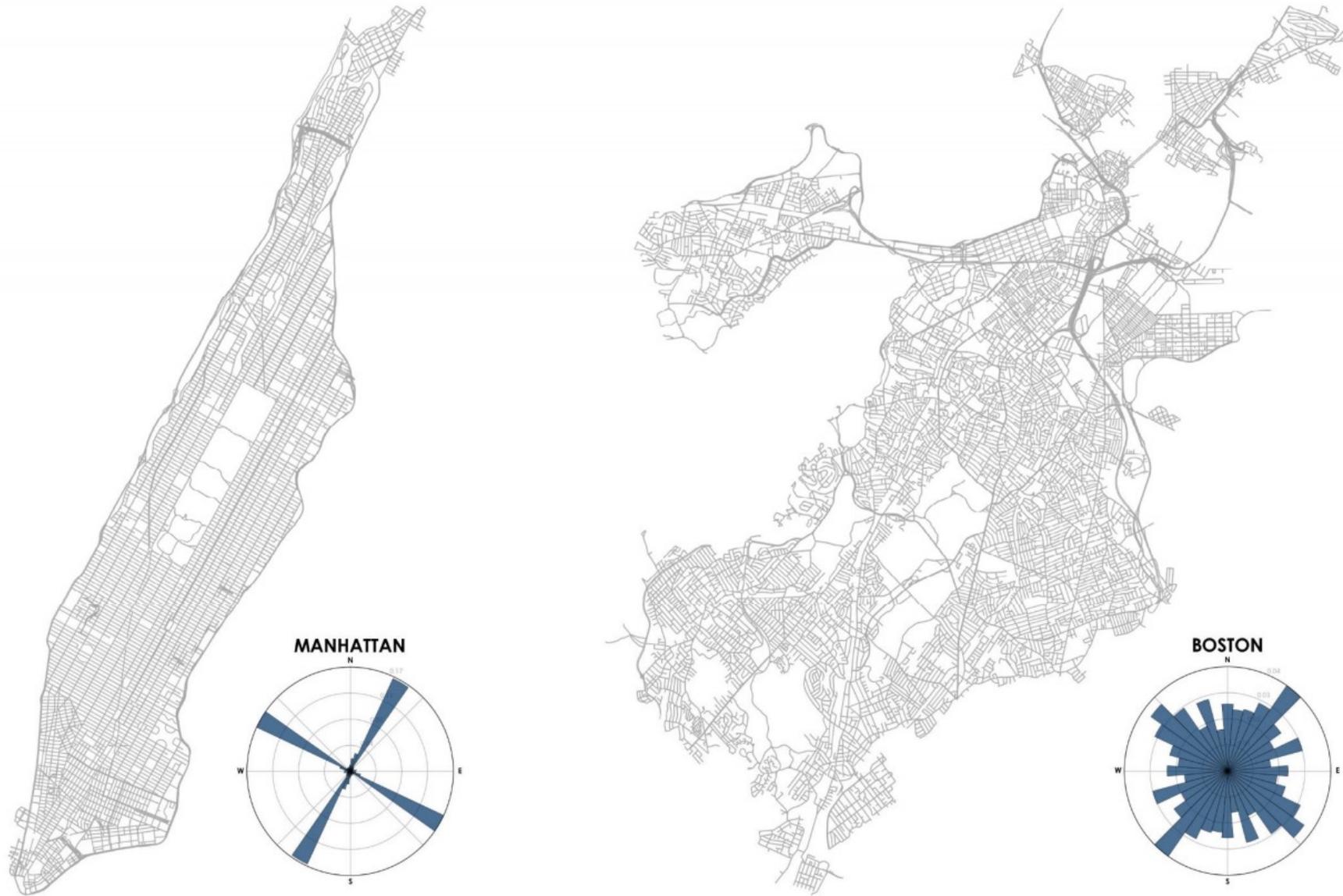
On peut mesurer et étudier de nombreuses choses sur ces réseaux:

- Hubs ? (nœuds très connectés)
- Centralité des nœuds (goulots d'étranglements)
- Existence de communautés ?
- Evolution dans le temps ?
- Multimodalité
- Effet de petit-monde ?

Et étudier de nombreux processus:

- Propagation de pannes, d'épidémies, etc.
- Résilience de ces réseaux face à des pannes ou attaques
- Importance du couplage entre les réseaux...

# Distribution des angles des rues



**Figure 3.** Street networks and corresponding polar histograms for Manhattan and Boston.

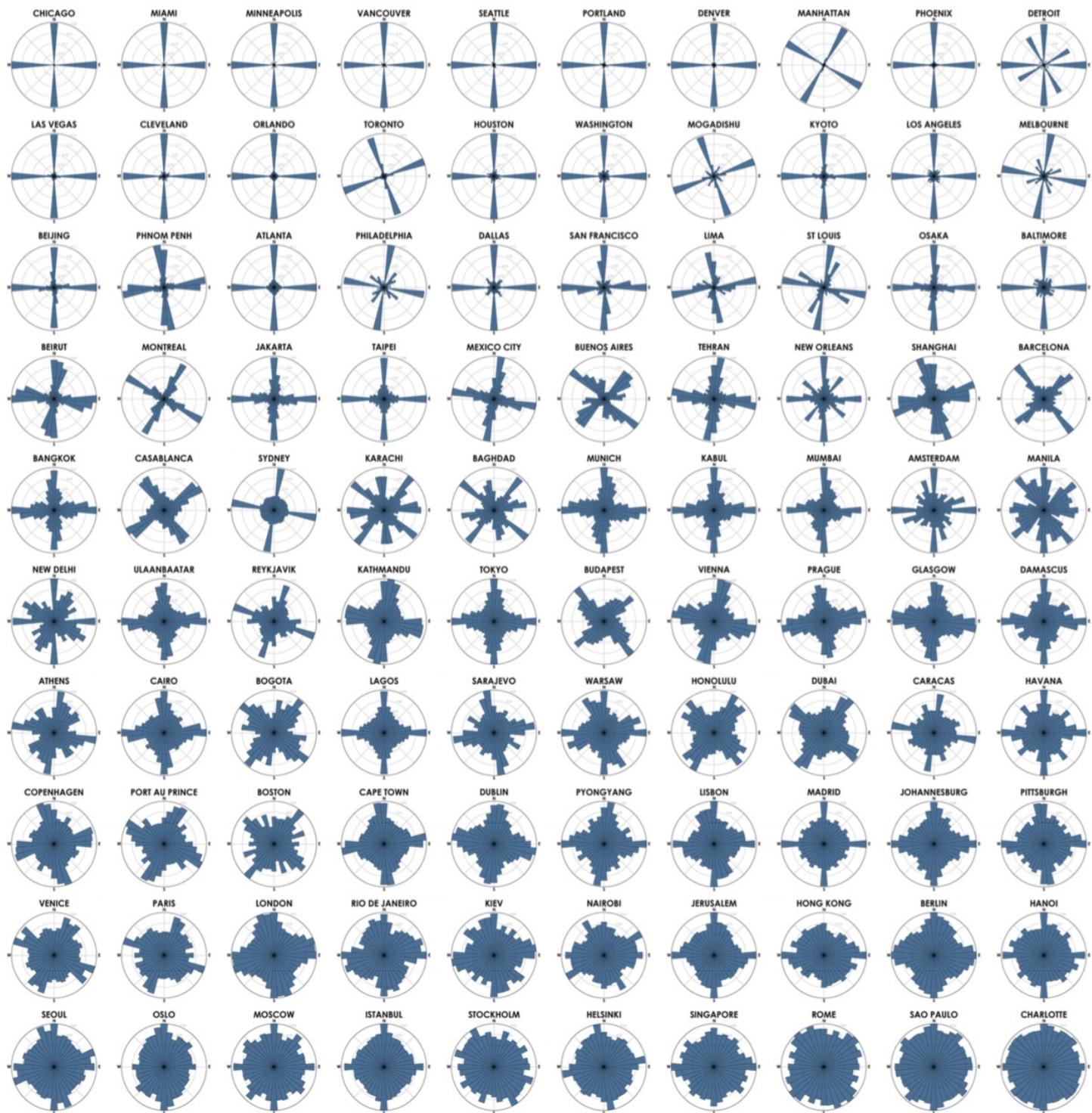
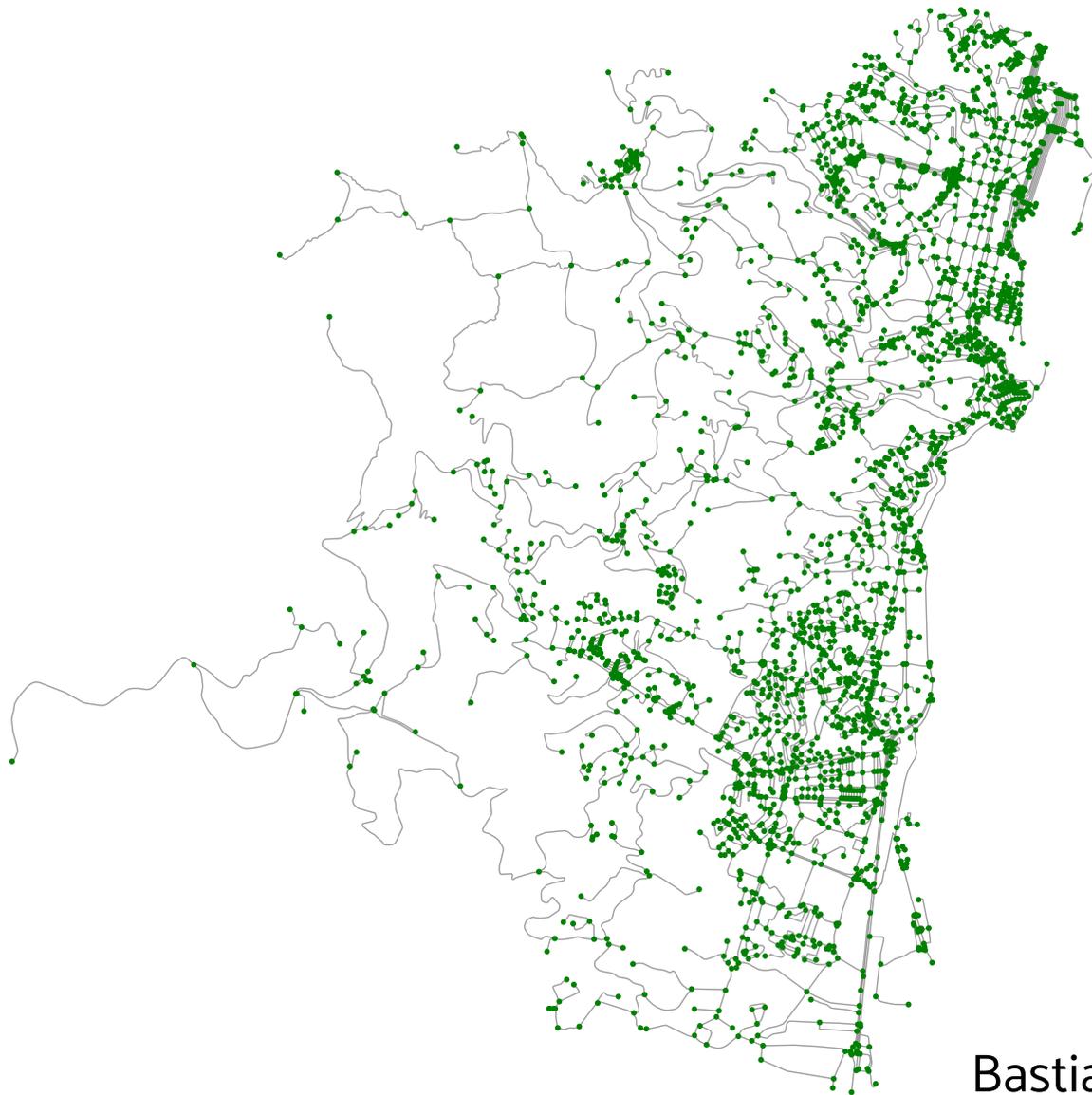


Figure 5. Polar histograms of 100 world cities' street orientations, sorted by descending  $\rho$  from most to least grid-like

# Réseaux des rues et chemins

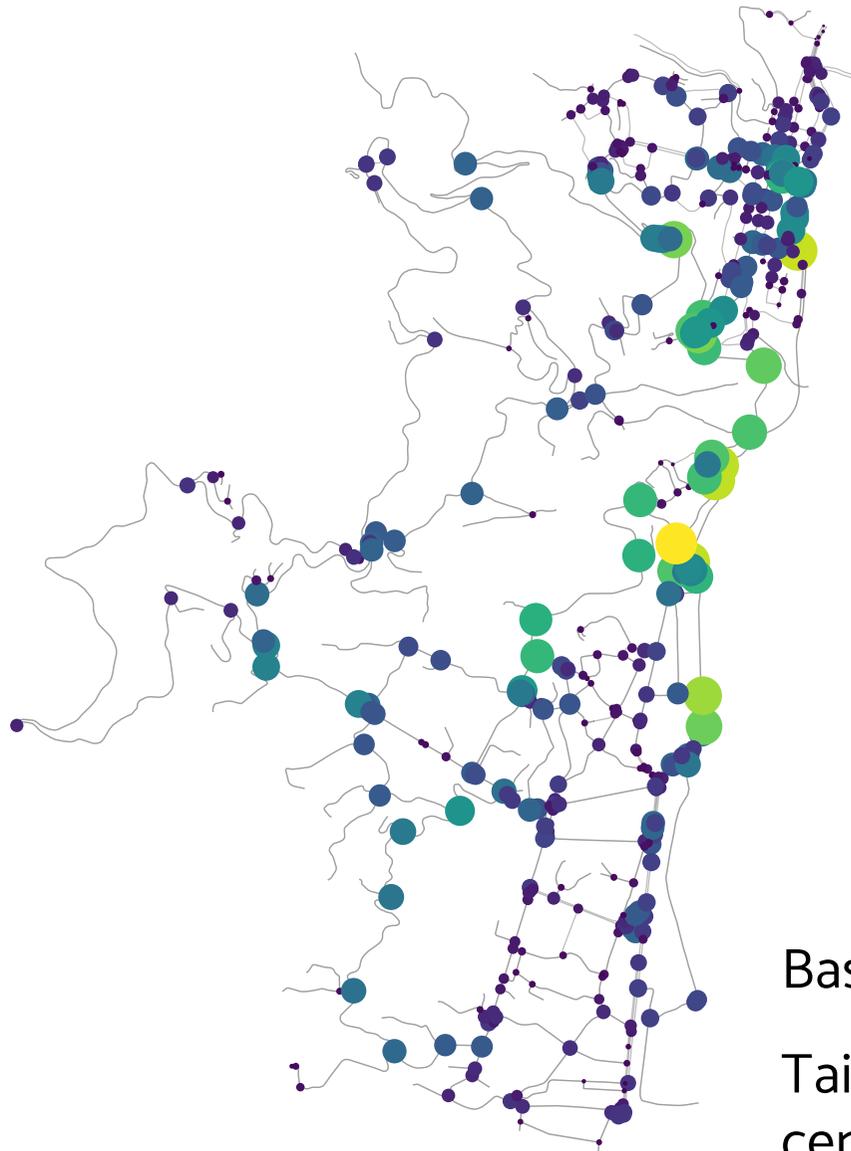


Nœuds: intersections

Liens: segments de routes

Bastia (rues et chemins, OpenStreetMap)

# Réseaux des routes



Nœuds: intersections

Liens: segments de routes

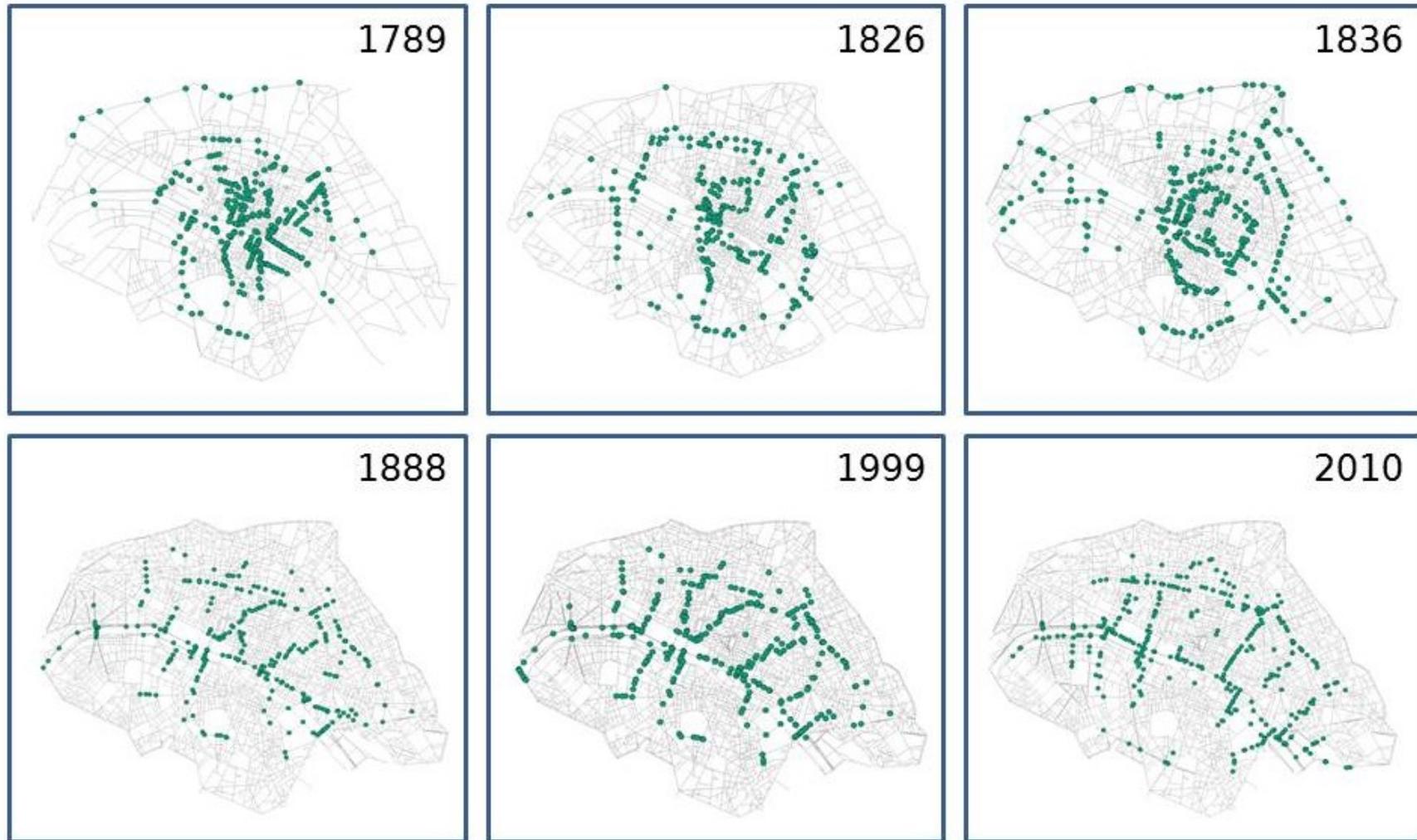
Bastia (routes, OpenStreetMap)

Taille et couleur des nœuds:  
centralité (goulots d'étranglement)

# Réseaux viaires (données historiques)

Nœuds: intersections

Liens: segments de routes



# Réseau de navetteurs (“commuters”)

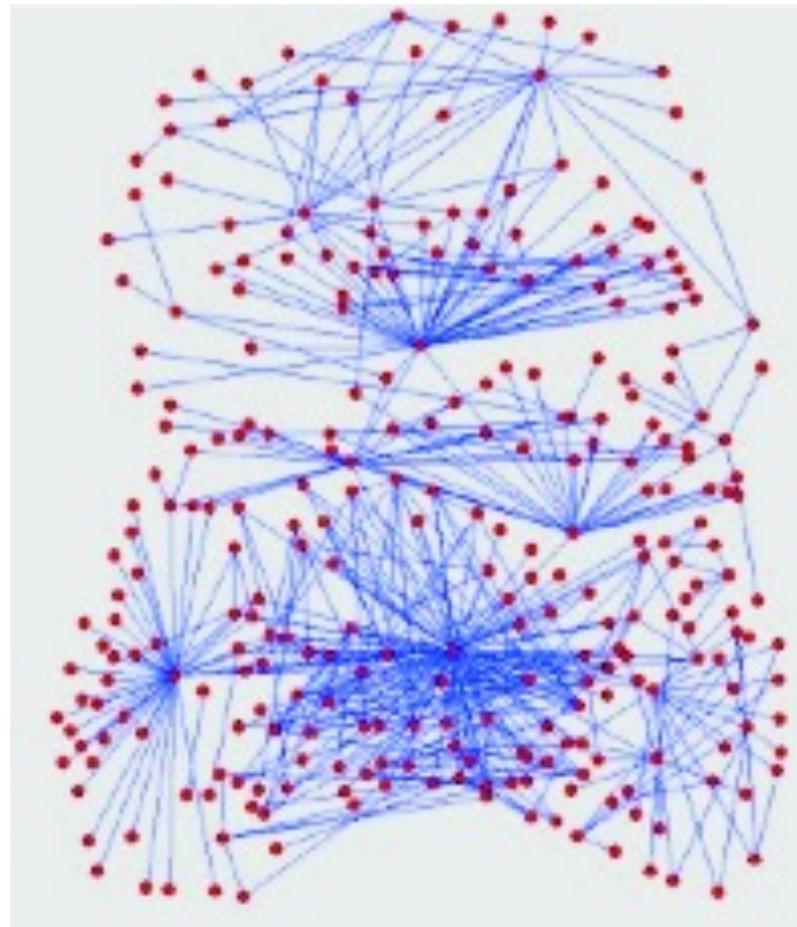
De Montis et al, Env. Plan. B (2007)

Nœuds: communes

Liens: flots de navetteurs



375 municipalités  
(Sardaigne)



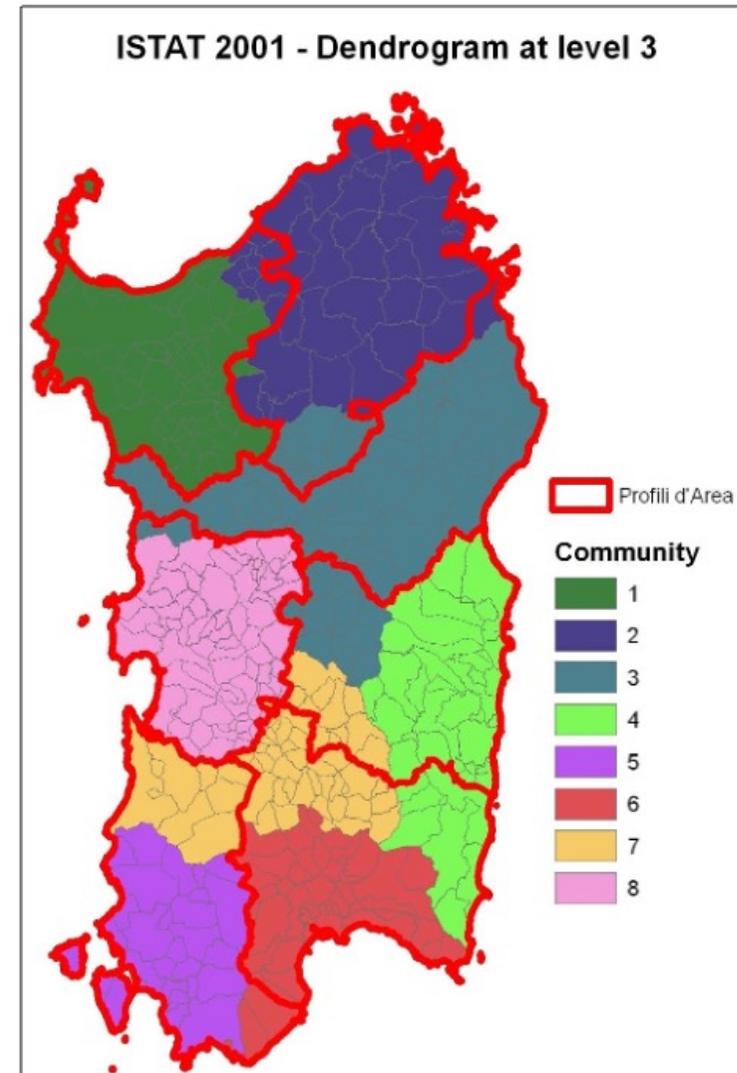
Réseau de navetteurs

# Communautés

## Réseaux des navetteurs en Sardaigne

A partir du réseau, on peut construire des communautés (groupes de nœuds plus reliés entre eux qu'avec le reste)

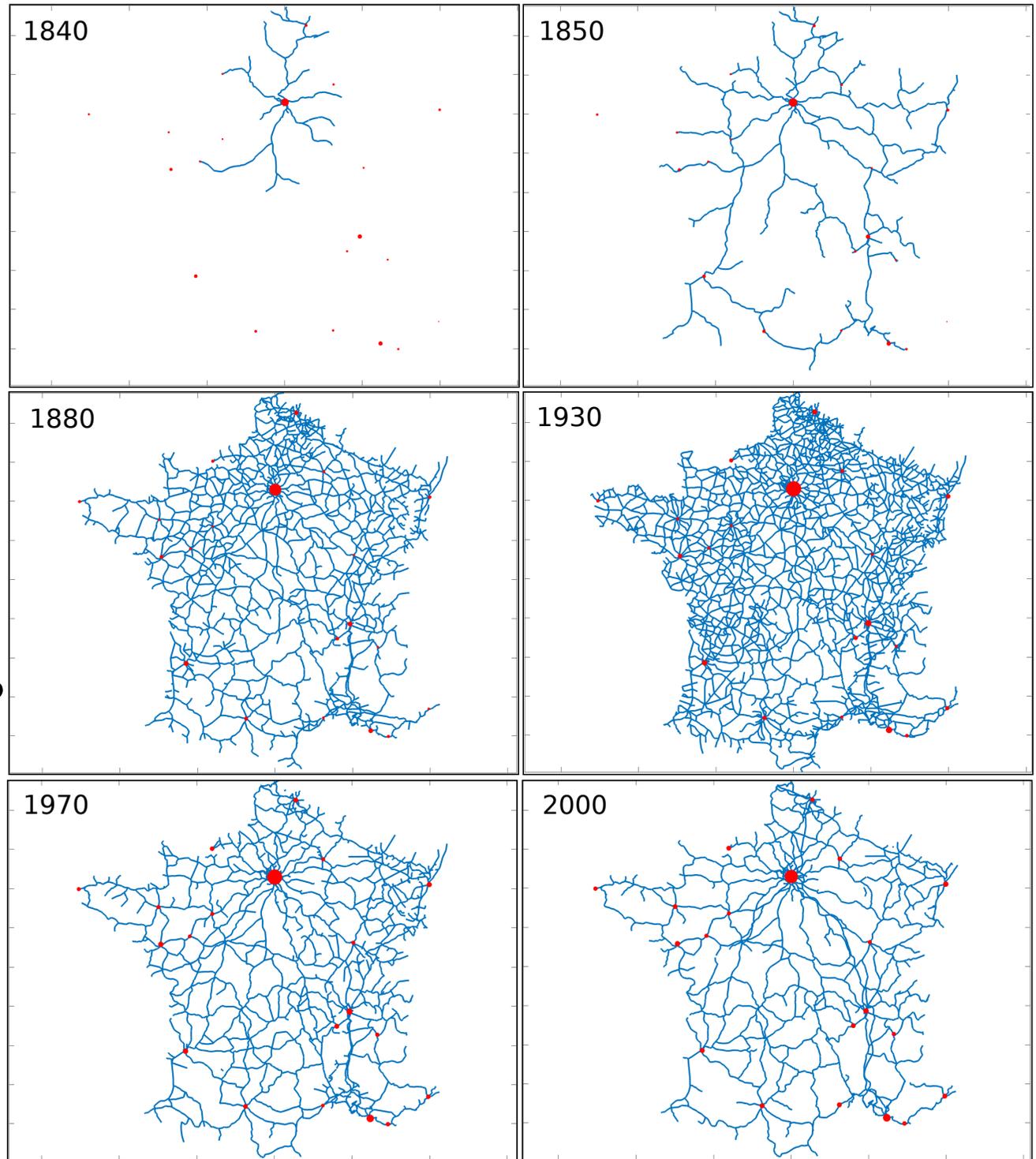
=> proposition scientifique de découpage de territoires



# Les réseaux dans le temps

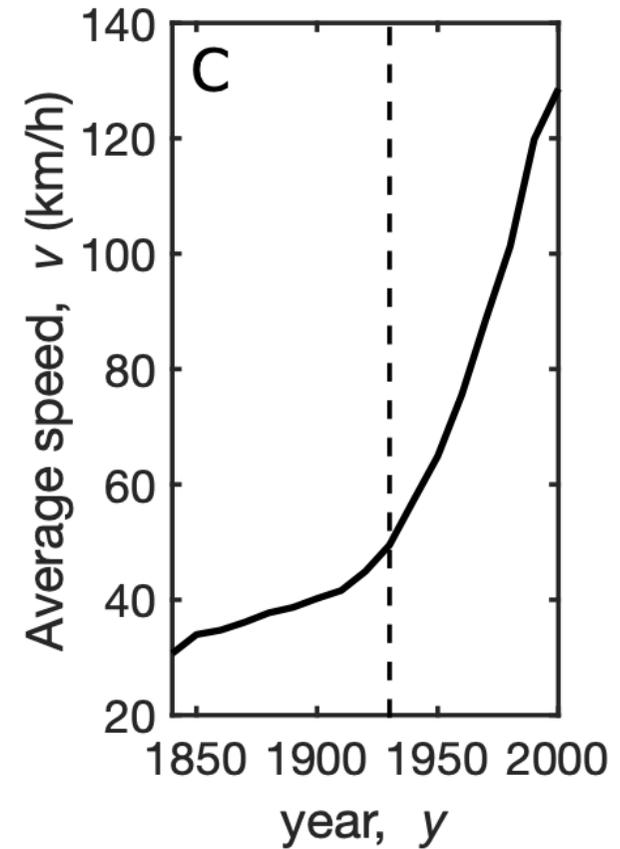
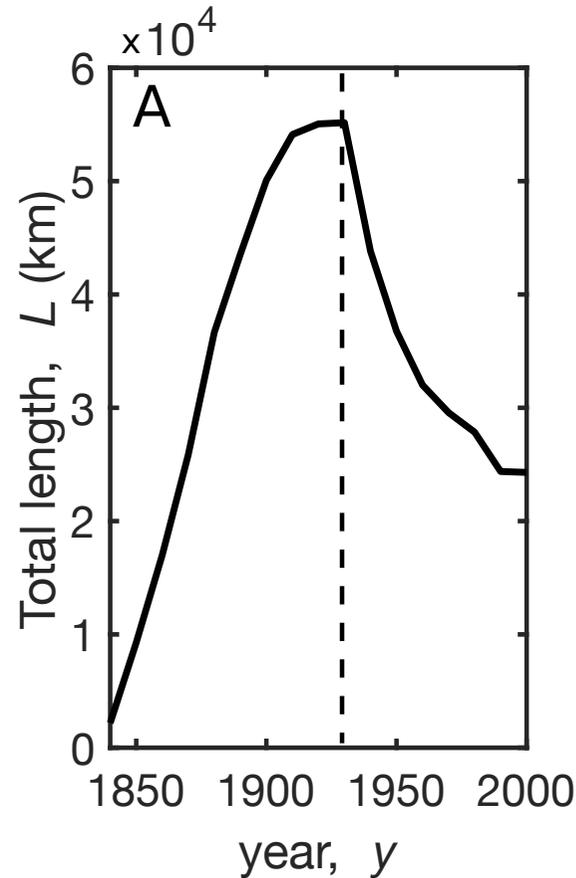
Evolution du réseau ferré français (1840-2000)

- Efficacité ?
- Couplage avec la densité de population ?



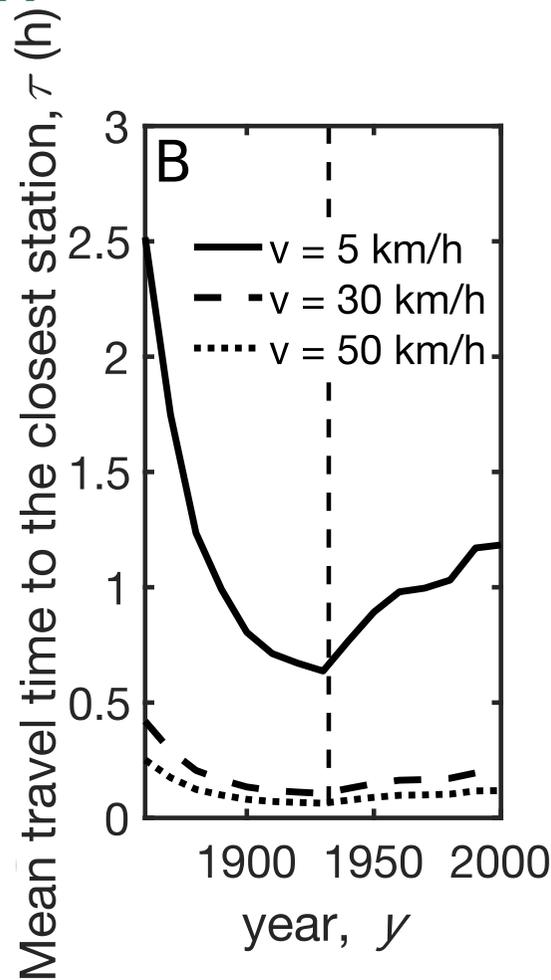
# Réseau ferré en France (1840-2000)

Exemple d'un réseau qui rétrécit !  
... mais qui va plus vite !

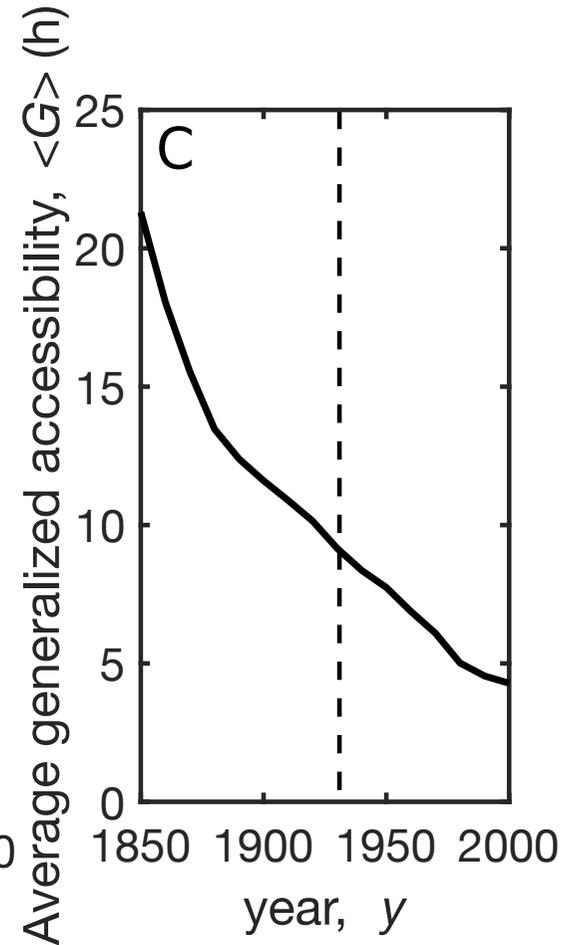


# Réseau ferré en France (1840-2000): couplage avec la population

Et qui relie plus rapidement les communes entre elles !



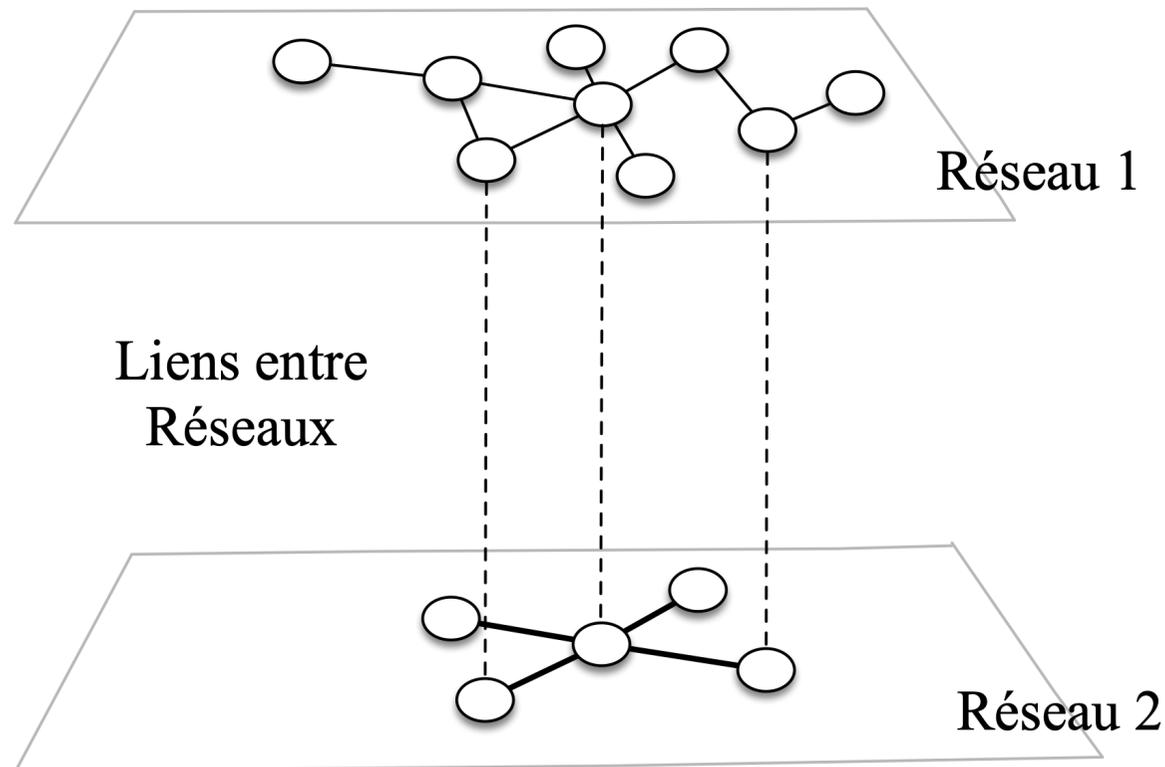
Temps moyen pour accéder à la station la plus proche



Temps moyen entre les paires de communes:  
décroissance !

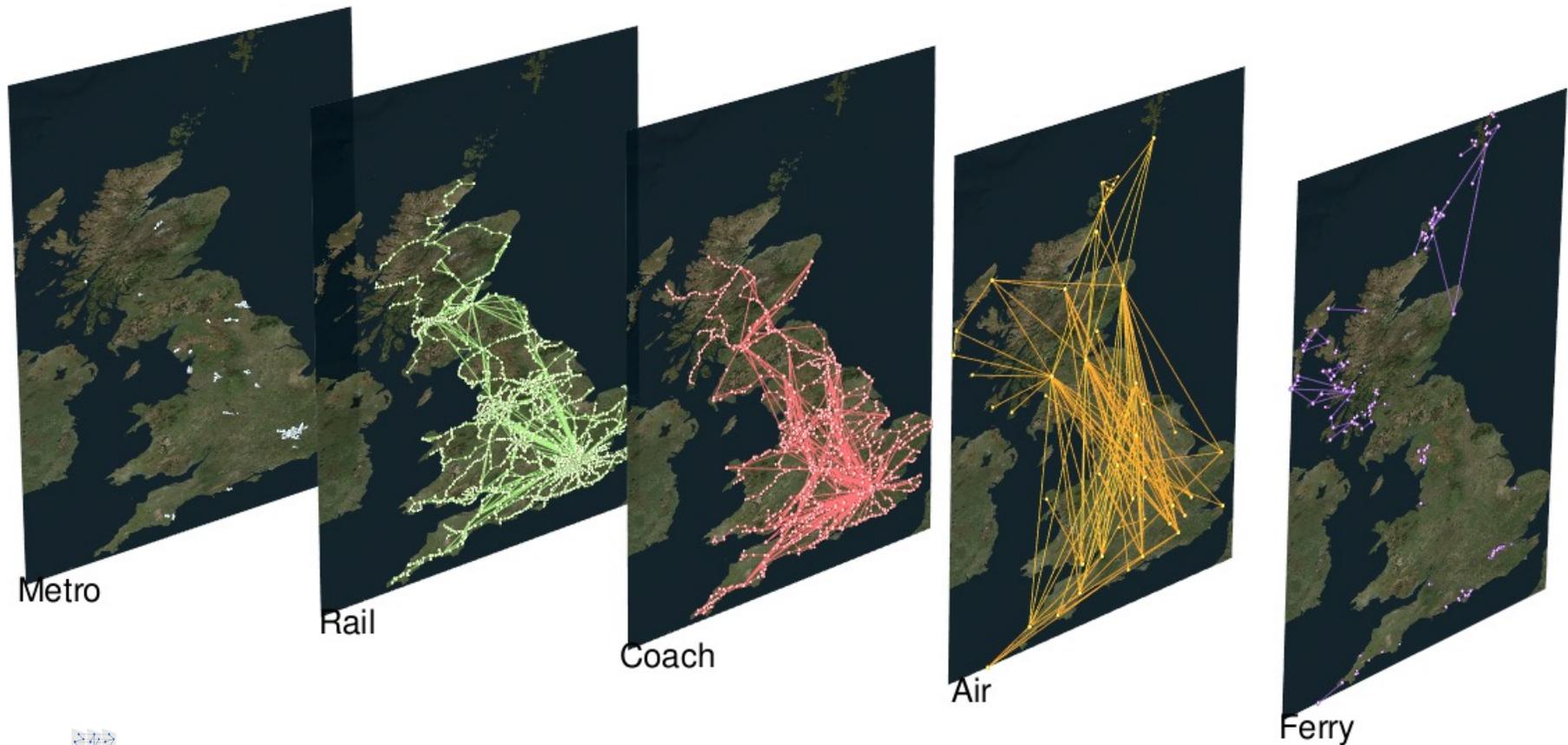
# Réseaux multicouches

- Chaque mode de transport est représenté par une couche
- Les couplages représentent les connexions entre les modes (bus-metro-train, etc).



# Réseaux multicouches

- Chaque mode de transport est représenté par une couche
- Les couplages représentent les connexions entre les modes (bus-metro-train, etc).

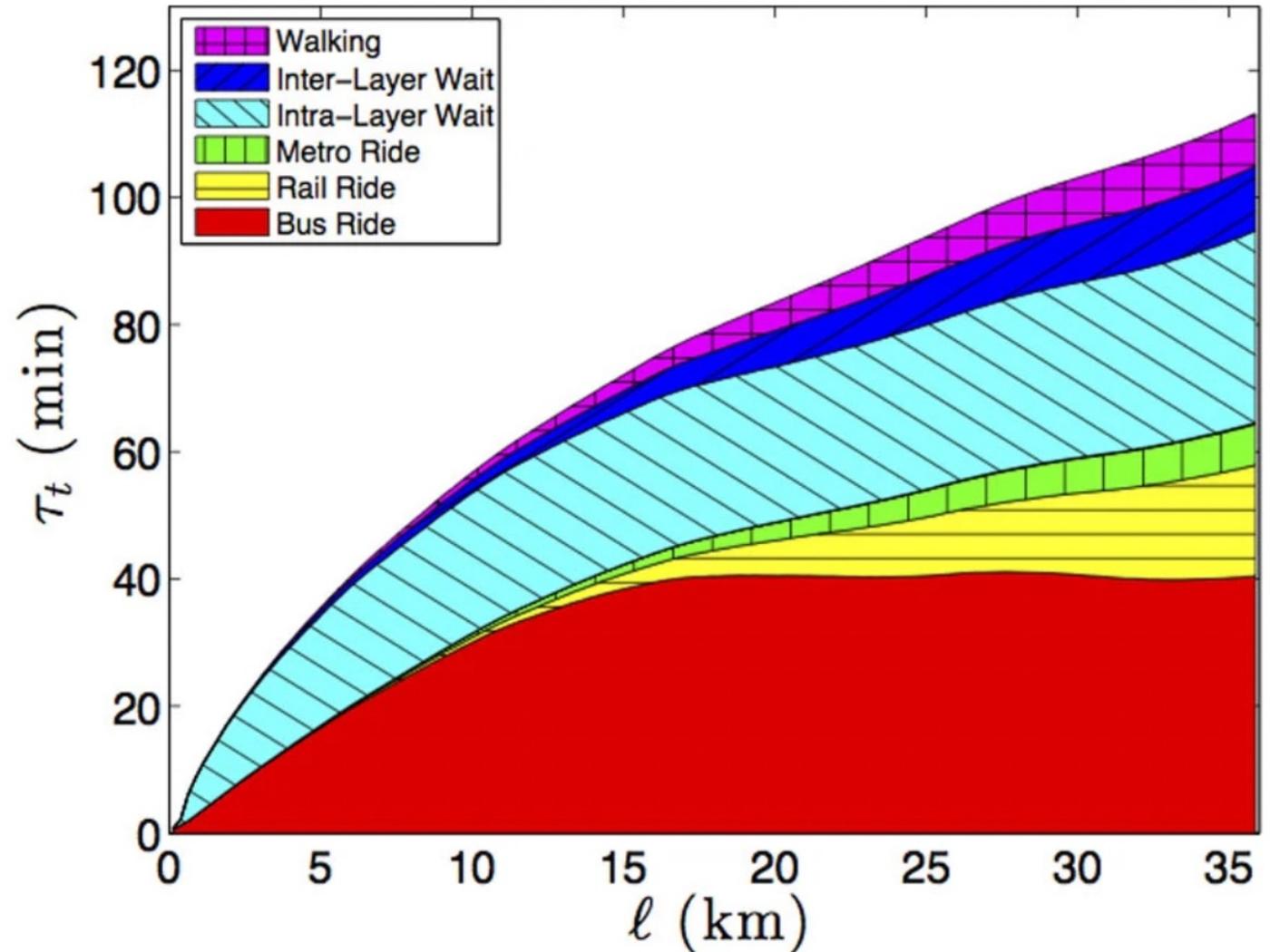


MUX  VIZ

<http://www.muxviz.net>

# Réseaux multicouches: « Anatomie » des déplacements (Manchester)

- Bus dominant
- Temps d'attente~ temps de voyage (connexions bus-bus)
- metro pour des distances plus grandes

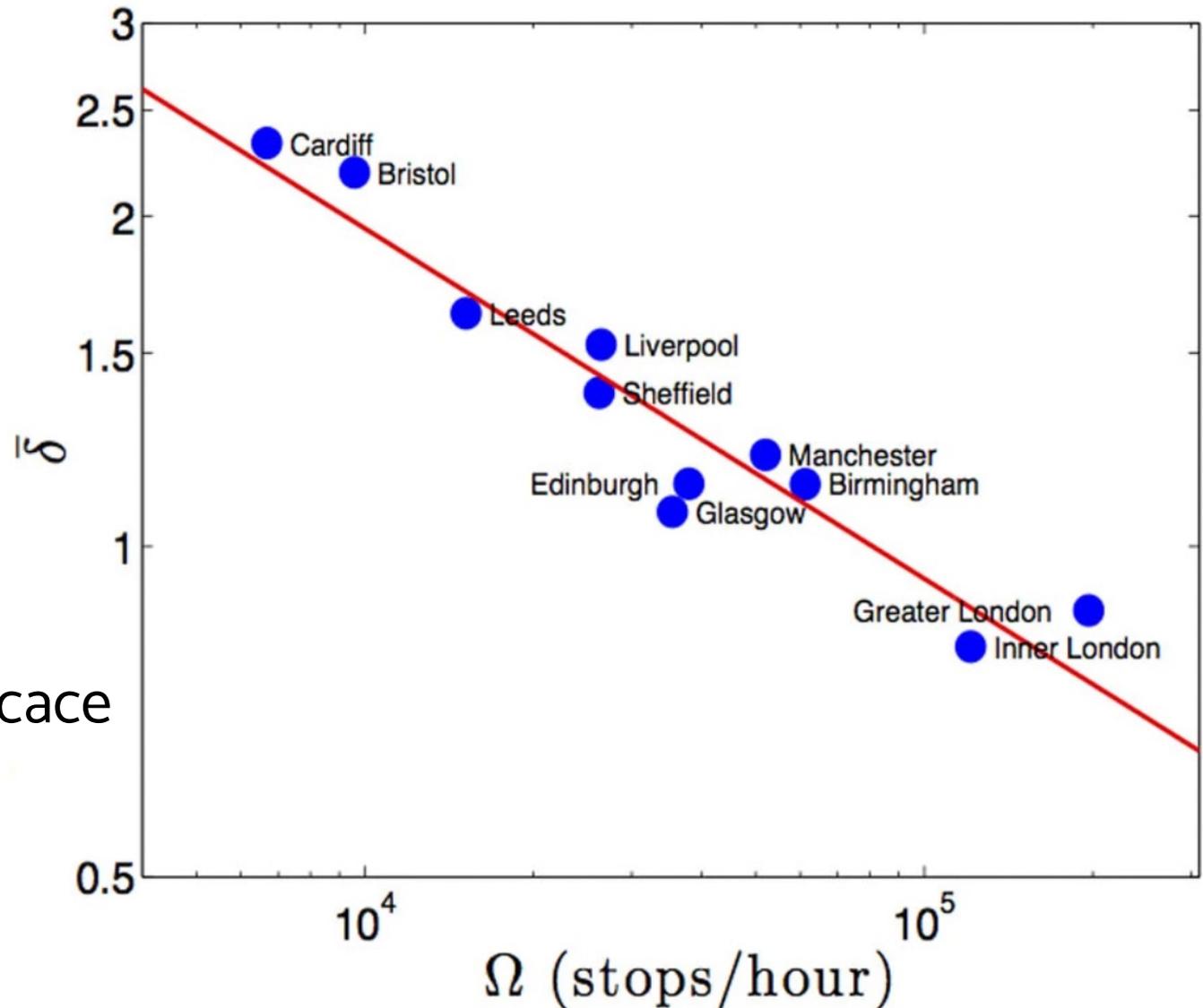


# Réseaux multicouches: Synchronisation des modes versus la fréquence

-  $\delta$  ~ temps d'attente entre modes

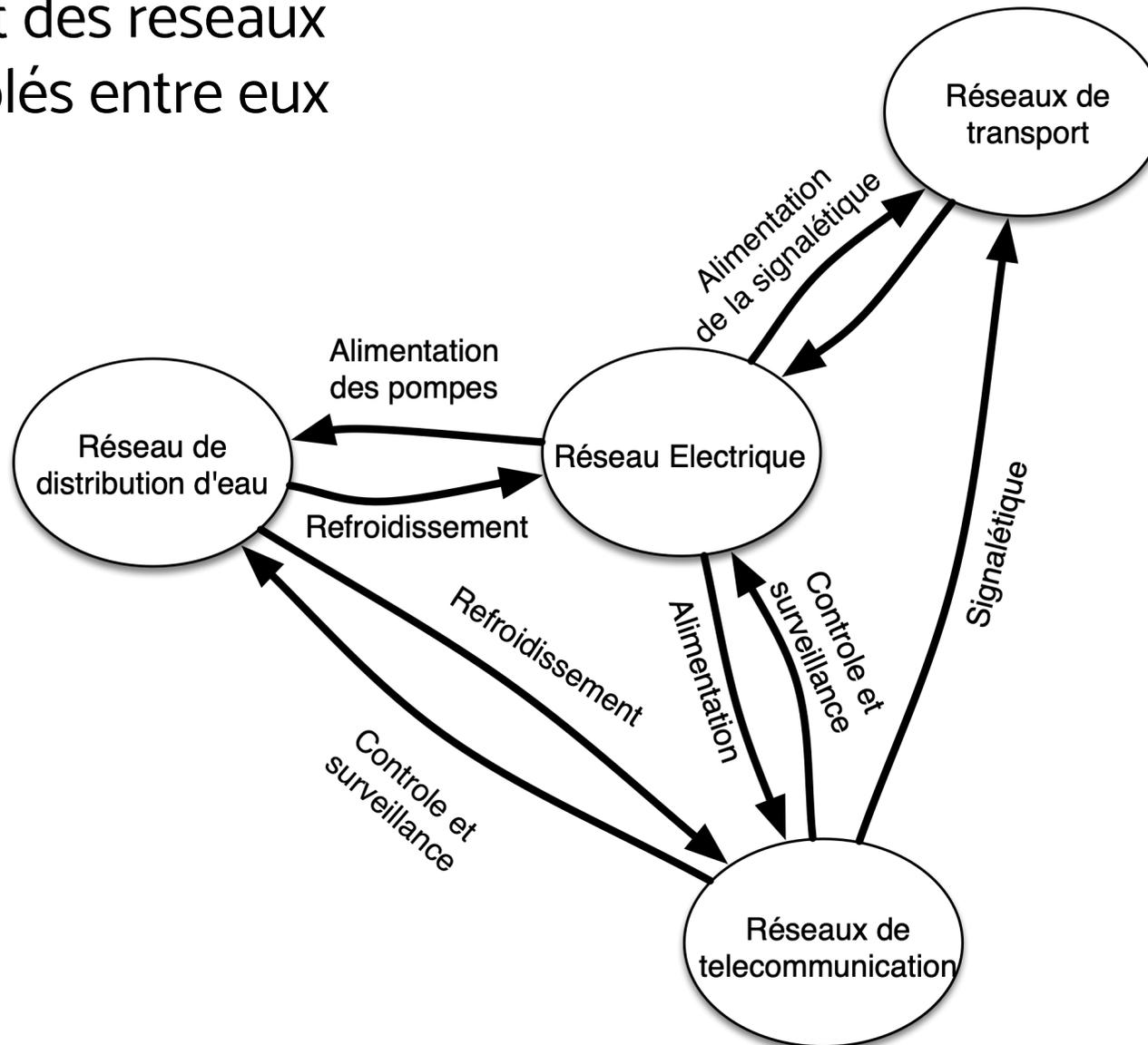
- Diminue avec la fréquence...mais très lentement

- Augmenter la fréquence est donc très peu efficace et très coûteux

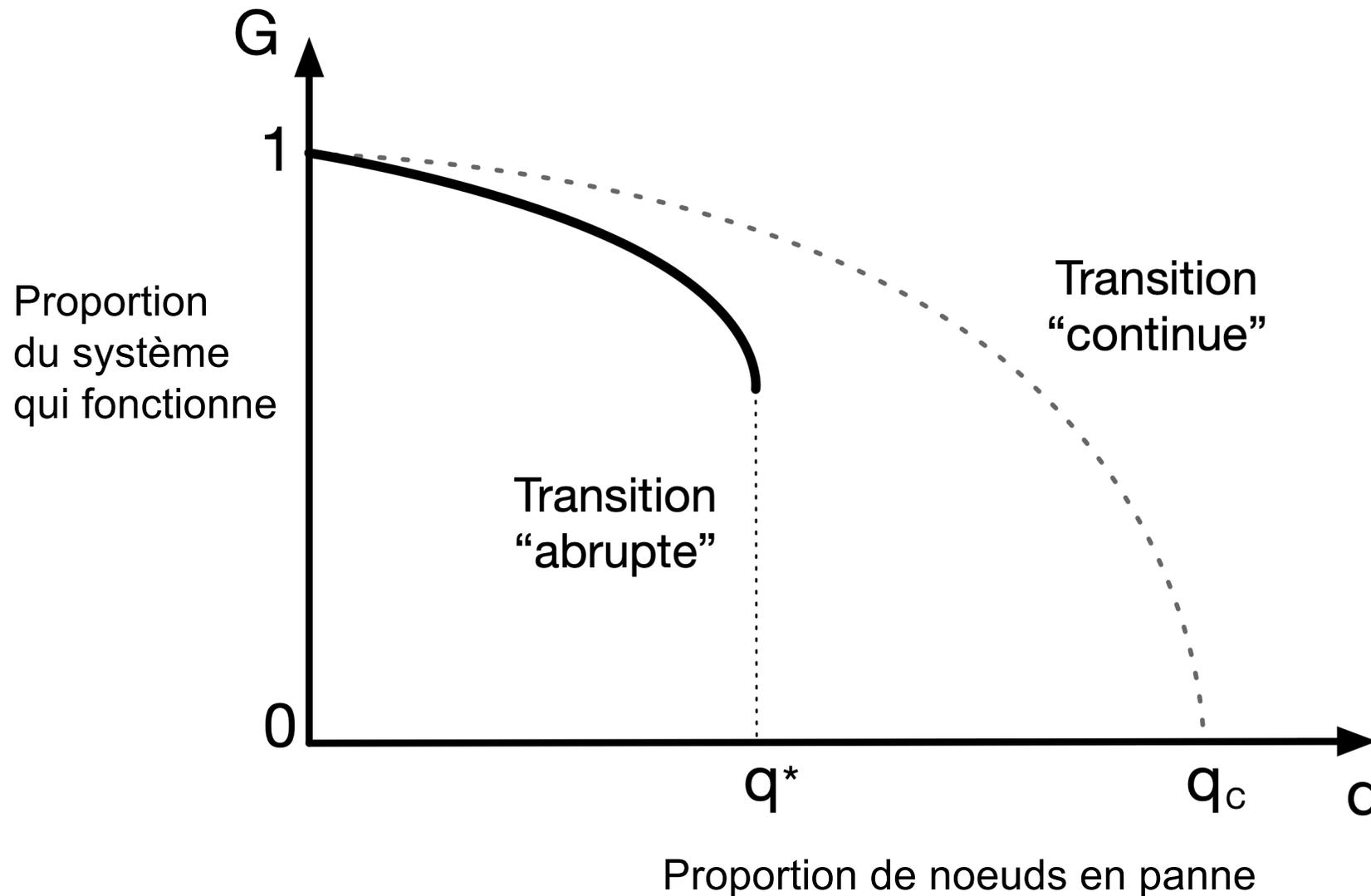


# Réseaux couplés: fragilité

La plupart des réseaux sont couplés entre eux



# Effet du couplage: fragilité



# Discussion

- Les réseaux constituent un outil très puissant d'analyse de nombreux phénomènes
- En particulier pour étudier les transports:
  - effet de l'intermodalité
  - résilience
  - optimisation
  - trafic automobile (points de congestion, etc.)
  - ...
- Point crucial: disponibilité des données

Merci pour  
votre attention.

<http://www.quanturb.com>  
[marc.barthelemy@ipht.fr](mailto:marc.barthelemy@ipht.fr)



Odile Jacob 2023