

# Analyse des réseaux

---

Juste Raimbault<sup>1</sup>

2025-2026

<sup>1</sup>LaSTIG, IGN-ENSG-UGE

**ENSG**  
Géomatique

ÉCOLE NATIONALE  
DES SCIENCES  
GÉOGRAPHIQUES

## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

Modèles

Mesures

Détection de communautés

## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

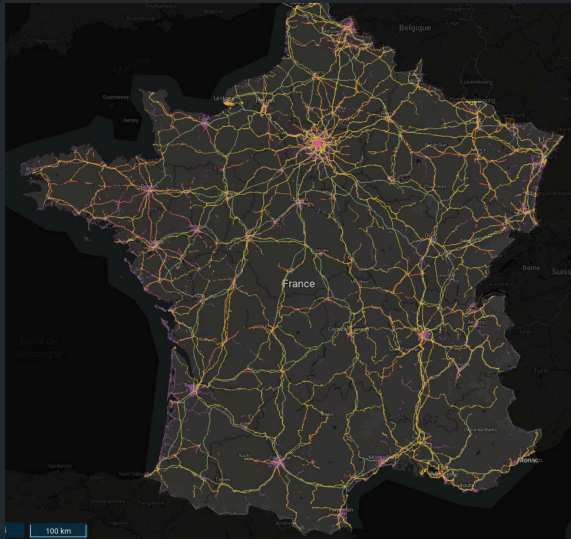
Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

Modèles

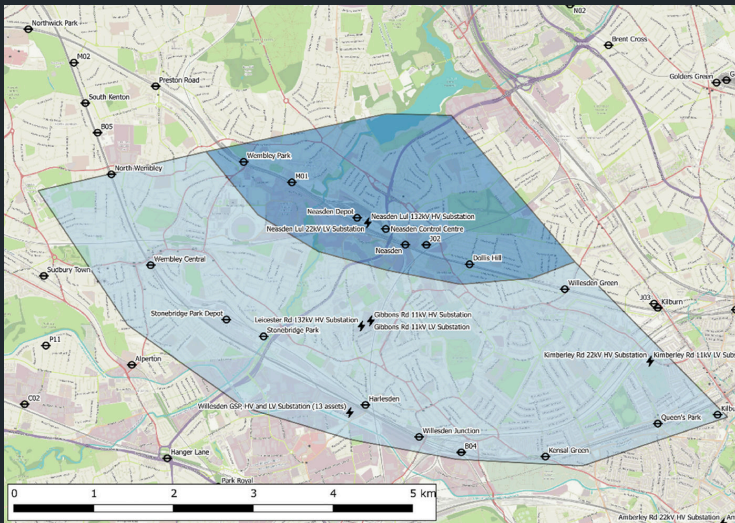
Mesures

Détection de communautés

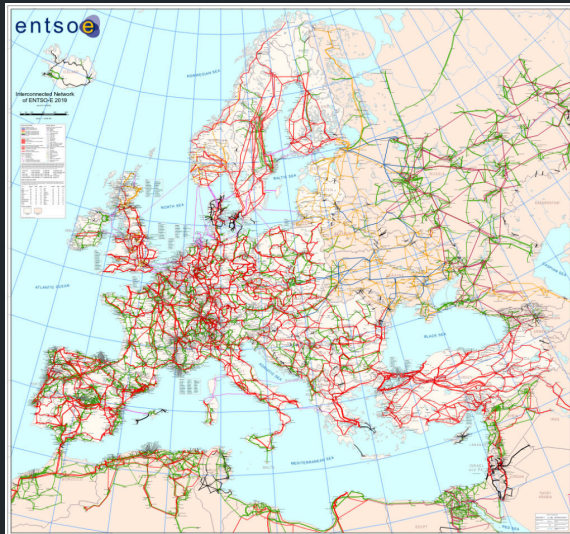


*Réseaux d'infrastructure de transport en France (source OSM data)*

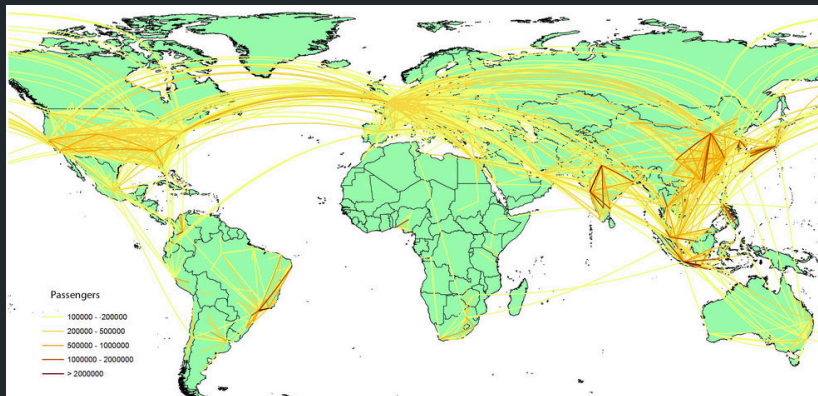
## Réseaux d'infrastructure interdépendants [Goldbeck et al., 2019]



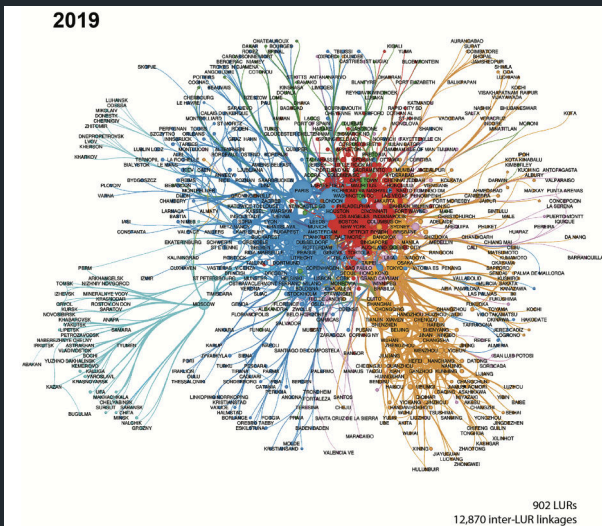
## Réseau électrique Européen (données ouvertes ENTSOE)



## Réseau mondial aérien de passagers estimé en 2010 [Huang et al., 2013]

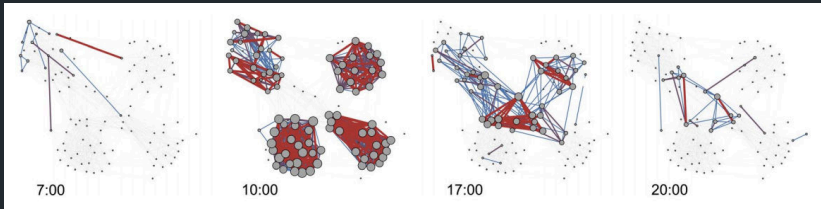


## Réseaux d'entreprises entre régions urbaines [Rozenblat, 2021]

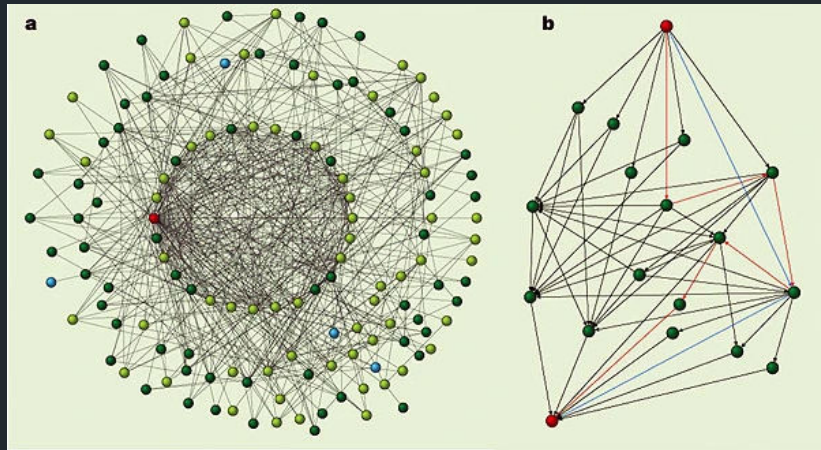




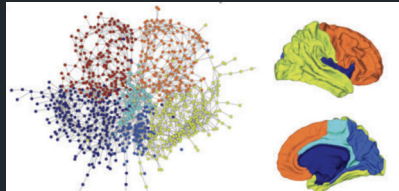
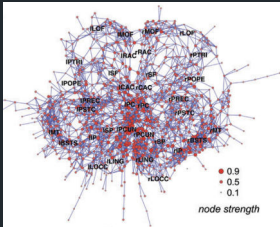
## Réseaux sociaux physiques et virtuels [Stopczynski et al., 2014]



## Réseaux trophiques entre espèces [Montoya et al., 2006]



## Réseau des neurones du cerveau [Sporns, 2011]



## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

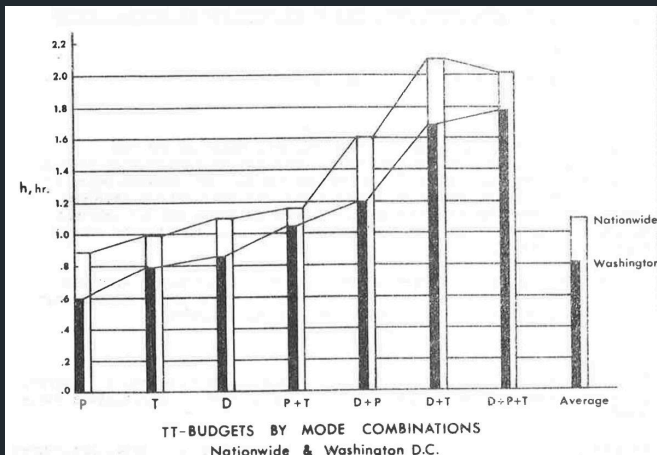
Modèles

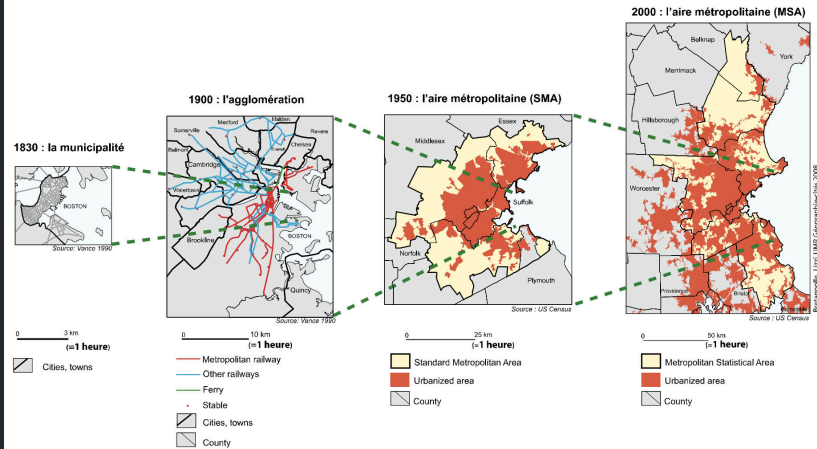
Mesures

Détection de communautés

- augmentation de la vitesse et de la capacité des transports augmente la portée des échanges, et donc de l'interaction spatiale
- dilatation de l'espace d'activité et accroissement de la dimension des entités territoriales à toutes les échelles (mais inégalement)
- du rôle dominant de la distance à celui de la proximité ?  
[Duranton, 1999]

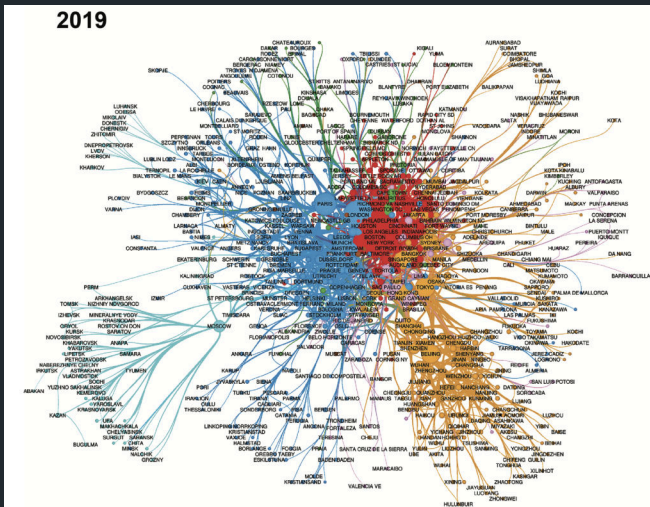
→ les dimensions de l'espace d'activité urbain (zones accessibles dans un espace-temps quotidien) sont stables  $\sim 1$ h - loi de Zahavi [Zahavi, 1974]





[Bretagnolle et al., 2008]

→ à l'échelle mondiale, des territoires politiques contrôlés par les réseaux à des réseaux d'activité mondialisés [Rozenblat, 2021]





G. Dupuy propose une *Théorie territoriale des réseaux* pour interpréter les interactions entre réseaux techniques et territoires [Dupuy, 1987]

→ réseaux techniques comme réalisation de réseaux virtuels, issus de projets transactionnels entre acteurs

→ les agents à l'échelle microscopique souhaitent maximiser la connectivité et l'accessibilité

→ en pratique, arbitrages par les acteurs de gouvernance [Raimbault and Le Néchet, 2021]

Définitions de l'accessibilité par un réseau de transport  
[Wu and Levinson, 2020]

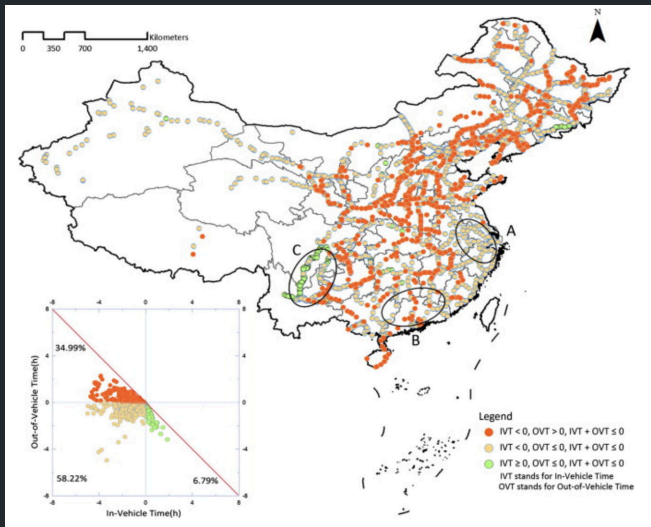
**Temps de trajet moyen**  $T_i = \sum_j P_j / P \cdot t_{ij}$

**Accessibilité aux aménités**

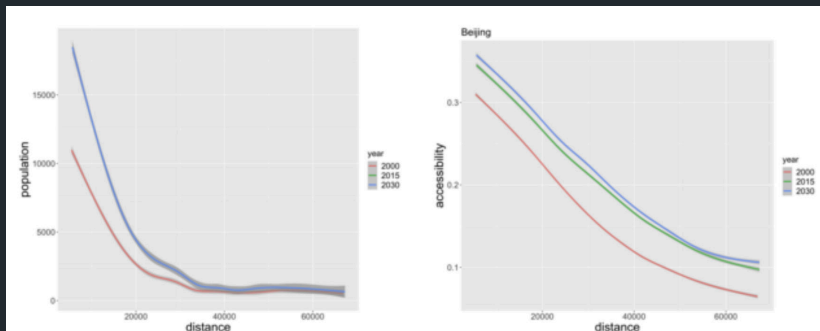
$$Z_i = P_i \sum_j E_j \cdot \exp(-t_{ij}/t_0)$$

avec le paramètre  $t_0$  soit calibré par modèle d'interactions spatiales,  
soit stylisé (ex. emplois accessibles en 1h)

# Exemple : accessibilité *HSR* en Chine



# Exemple : accessibilité TC dans les villes chinoises



[Raimbault, 2021b]

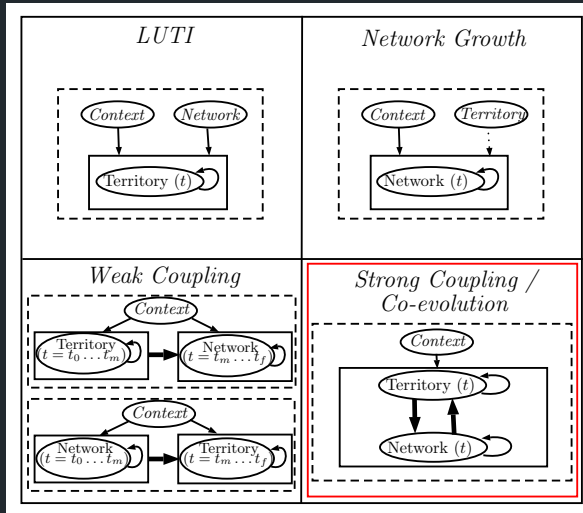
Un débat scientifique :

- Méthodes en économie des transports dans les années 80 pour quantifier les “effets structurants” des infrastructures [Bonnafeous and Plassard, 1974]; modèles LUTI [Wegener and Fürst, 2004]
- Usage trop politique du concept non prouvé d’effet structurant ? [Offner, 1993]
- Dépend des cas, des échelles, des méthodologies (par exemple identifiables dans les systèmes de villes sur le temps long [Bretagnolle, 2014]) [Offner et al., 2014]
- Approche de planification couplée ? *Transit-oriented development* [Ibraeva et al., 2020]

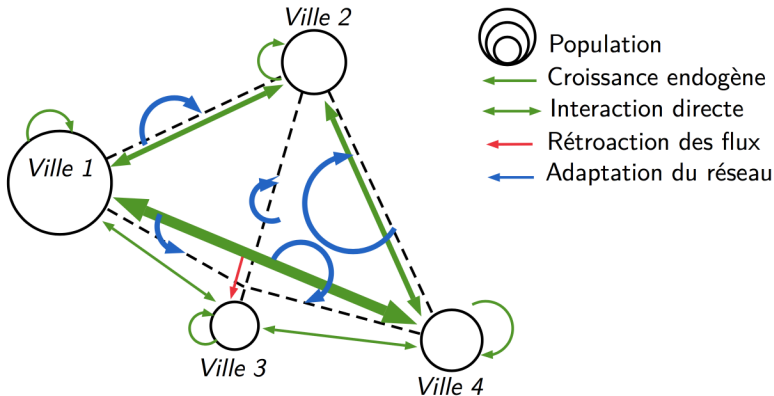
## Diversité des processus sous-jacents [Raimbault, 2018]

	Networks → Territories	Territories → Networks	Networks ↔ Territories
Micro	<b>Economics:</b> real estate market, relocalization, employment market	NA	<b>Computer Science :</b> spontaneous growth
	<b>Planning:</b> regulations, development		
Meso	<b>Economics:</b> real estate market, transportation costs, amenities	<b>Economics:</b> network growth, offer and demand	<b>Economics:</b> investments, relocalizations, offer and demand, network planning <b>Geography:</b> land-use, network growth, population diffusion
	<b>Geography:</b> land-use, centrality, urban sprawl, network effects	<b>Transportation:</b> investments, level of governance	
	<b>Planning/transportation:</b> accessibility, land-use, relocalization, real estate market	<b>Physics:</b> topological correlations, hierarchy, congestion, local optimization, network maintenance	
Macro	<b>Economics:</b> economic growth, market, land-use, agglomeration, sprawl, competition	<b>Economics:</b> interactions between cities, investments	<b>Economics:</b> offer and demand <b>Transportation:</b> network coverage
	<b>Geography:</b> accessibility, interaction between cities, relocalization, political history	<b>Geography:</b> interactions between cities, potential breakdown	
	<b>Transportation:</b> accessibility, real estate market	<b>Transportation:</b> network planing	

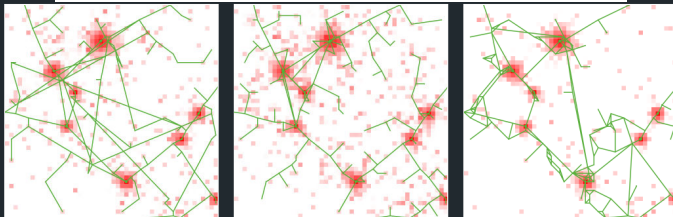
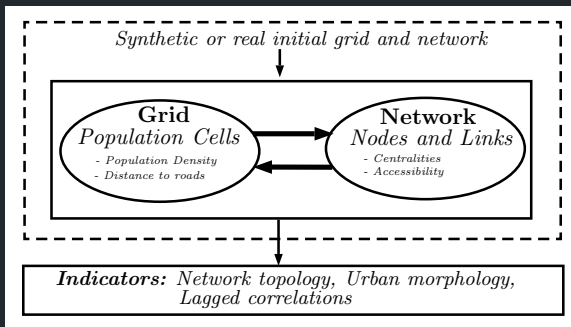
## Exemples d'approches de modélisation [Raimbault, 2018]



Echelle macroscopique du système de villes [Raimbault, 2020]  
[Raimbault, 2021a]







## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

Modèles

Mesures

Détection de communautés

## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

Modèles

Mesures

Détection de communautés

Graphe  $G = (V, E)$ ,  $V$  sommets (avec ou sans) attributs et  $E \subset V \times V$  liens

- Orienté ou non
- Pondération des liens  $w : E \rightarrow \mathbb{R}$
- Extension avec multiple liens (graphe multiplexe)

*Historiquement : L. Euler et les ponts de Konisberg (1741)*

Matrice d'adjacence  $A \in \mathcal{M}_{|V|}(\mathbb{R})$  donne les relations entre sommets

Matrice d'incidence  $A \in \mathcal{M}_{|V|,|E|}(\mathbb{R})$  relations entre sommets et liens (sortant, entrant)

Matrice Laplacienne : avec  $D = d_i \cdot I$  matrice des degrés (nombre de voisins),  $L = D - A$ . Ses valeurs propres fournissent des propriétés du graphe.

## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

Modèles

Mesures

Détection de communautés

*Parcours en largeur pour distances dans un graphe non pondéré;  
composantes connexes*

```
for v in sommets: v.visited = false
file = List()
file.add(s)
while not file.empty
    next = file.last
    next.visited = true
    for v in next.neighbors
        file.add(v)
end
```

Changer la file en pile: parcours en profondeur

**Complexité :** (pire des cas)  $O(|V| + |E|)$

Algorithme gourmand pour le chemin le plus court à partir d'une source

```
parcours = Set()
distances = Array(sommets.length)(double.maxvalue)
distances[s]=0
previous = Array(sommets.length)
while parcours.length < sommets.length
    next = sommet not in parcours with minimal distances
    Parcours.add(next)
    for v in next.neighbors not in parcours:
        if distances[v] > distances[next] + w(next,b)
            update distances[v]; previous[v]=next
end
```

**Complexité :**  $O((|V| + |E|)\log(|V|))$



L'algorithme de Dijkstra recherche “aveuglément” → propagation dans toutes les directions dans un espace géographique

→ comment guider la recherche pour gagner en temps de calcul ?

→ Dans l'algorithme A\* ajout d'un terme heuristique à l'objectif à minimiser lors de la selection du prochain noeud

→ la distance géographique à la destination augmente la performance en conservant son exactitude

*Algorithme de programmation dynamique pour calculer l'ensemble des plus courts chemins (matrice de distance); fonctionne avec des poids négatifs*

```
A = adjacency matrix
for k in sommets:
    for i in sommets:
        for j in sommets:
            A[i, j] = min(A[i, j], A[i, k] + A[k, j])
```

Complexité :  $O(|V|^3)$

**Première partie du TP :** algorithmes sur les graphes sur des réseaux synthétiques

**Données :** graphe aléatoires générés par le package igraph

## Introduction

- Diversité des types de réseaux

- Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

- Définitions

- Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

- Modèles

- Mesures

- Détection de communautés

- Emergence depuis les années 2000 d'une approche interdisciplinaire des graphes de grande taille (*Network Science*) [Albert and Barabási, 2002]
- Méthodes importées de la physique statistique, maintenant proche de l'apprentissage statistique
- Applications dans des disciplines très diverses

## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

Modèles

Mesures

Détection de communautés

**Erdos-Renyi** : graphe aléatoire [Erdős et al., 1960] (degré distribution de Poisson)

**Watts-Strogatz** : à partir d'une grille, rebranche chaque noeud avec une probabilité fixe [Watts and Strogatz, 1998] (réseau petit-monde)

**Barabasi-Albert** : ajoute liens avec une probabilité proportionnelle au degré [Barabási and Albert, 1999] (degré distribution loi d'échelle)

**Stochastic Block Model** : matrice de probabilité pour les liens, génère une structure hiérarchique en communautés

## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

Modèles

Mesures

Détection de communautés



**Degré :** nombre de voisins

**Degré pondéré :** somme des poids incidents

**Coefficient de clustering :** proportion de paires de voisins connectées entre elles (mesure des triades à l'échelle globale)



[Crucitti et al., 2006]

*Centralité d'un noeud basée sur sa proximité aux autres*

$$C = \frac{1}{N-1} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

*Centralité basée sur le trafic traversant le noeud*

→ nombre de plus courts chemins entre deux autres sommets passant par le noeud

Lien avec la distribution du trafic (dernière étape du modèle à 4 étapes) : cas le plus simple d'absence de congestion

*Algorithme initial de google pour classer les résultats de recherche, équivaut à une centralité dans le graphe des hyperliens (liée au spectre de la matrice d'adjacence)*

$$R_i = \frac{1 - k}{N} + k \cdot \sum_{j \in N(i)} \frac{R_j}{L_j}$$

avec  $N$  noeuds,  $k$  paramètre,  $N(i)$  voisins,  $L_j$  nombre de liens

## Introduction

Diversité des types de réseaux

Effets géographiques des réseaux

## Théorie des graphes

Définitions

Algorithmes dans les graphes

## Réseaux complexes

Modèles

Mesures

Détection de communautés

*Mesure de l'adéquation d'une partition (communautés) à la structure du réseau (les liens sont-ils internes aux communautés ?)*

**Matrice de modularité**  $B_{ij} = A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2n}$  avec  $A_{ij}$  adjacence,  $k_i$  degré,  $n$  nombre de noeuds

**Modularité**

$$Q = \frac{1}{2n} \sum_{ij} \left[ A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2n} \right] \delta(c_i, c_j)$$

**Assortativité** (modularité normalisée)  $M = Q / Q_{max}$

Algorithmes pour isoler la structure modulaire d'un réseau, souvent cherchant à maximiser la modularité (clustering non-supervisé)  
[Fortunato and Hric, 2016]

- Girvan Newman, clustering hiérarchique basé sur la centralité de chemin [Girvan and Newman, 2002]
- Clauset Newman, optimisation gourmande de la modularité [Clauset et al., 2004]
- Louvain, optimisation multi-niveau de la modularité [Blondel et al., 2008]
- Vecteurs propres, Random walks, modèles de spin, ...

*Plupart des méthodes implémentées dans le package igraph*






**Deuxième partie du TP :** analyse de réseau social - distributions des degrés, centralités, communautés

**Données :** Co-occurences des personnages de *A song of Ice and Fire* de *G.R.R. Martin*, disponibles (CC-BY-NC-SA) à <https://github.com/mathbeveridge/asoiaf>

**Troisième partie du TP :** construire un graphe spatial modélisant un réseau de transport (calculs de temps de trajets, accessibilité, ...)

**Données :** OpenStreetMap

-  Albert, R. and Barabási, A.-L. (2002).  
**Statistical mechanics of complex networks.**  
*Reviews of modern physics*, 74(1):47.
-  Barabási, A.-L. and Albert, R. (1999).  
**Emergence of scaling in random networks.**  
*science*, 286(5439):509–512.
-  Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., and Lefebvre, E. (2008).  
**Fast unfolding of communities in large networks.**  
*Journal of statistical mechanics: theory and experiment*, 2008(10):P10008.



Bonnafous, A. and Plassard, F. (1974).

**Les méthodologies usuelles de l'étude des effets structurants de l'offre de transport.**


*Revue économique*, pages 208–232.




Bretagnolle, A. (2014).

**Les effets structurants des transports, une question d'échelles?**

*L'Espace géographique*, 43(1):63–65.

 Bretagnolle, A., Giraud, T., and Mathian, H. (2008).  
**La mesure de l'urbanisation aux etats-unis, des premiers  
comptoirs coloniaux aux metropolitan areas (1790-2000).**

*Cybergeog: European Journal of Geography.*

 Clauset, A., Newman, M. E., and Moore, C. (2004).  
**Finding community structure in very large networks.**  
*Physical review E*, 70(6):066111.

 Crucitti, P., Latora, V., and Porta, S. (2006).  
**Centrality measures in spatial networks of urban streets.**  
*Physical Review E*, 73(3):036125.



Dupuy, G. (1987).

**Vers une théorie territoriale des réseaux: une application au transport urbain.**

In *Annales de géographie*, pages 658–679. JSTOR.



Duranton, G. (1999).

**Distance, land, and proximity: economic analysis and the evolution of cities.**




*Environment and Planning a*, 31(12):2169–2188.




Erdős, P., Rényi, A., et al. (1960).

**On the evolution of random graphs.**


*Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci*, 5(1):17–60.

-  Fortunato, S. and Hric, D. (2016).  
**Community detection in networks: A user guide.**  
*Physics reports*, 659:1–44.
-  Girvan, M. and Newman, M. E. (2002).  
**Community structure in social and biological networks.**  
*Proceedings of the national academy of sciences*,  
99(12):7821–7826.
-  Goldbeck, N., Angeloudis, P., and Ochieng, W. Y. (2019).  
**Resilience assessment for interdependent urban  
infrastructure systems using dynamic network flow  
models.**  
*Reliability Engineering & System Safety*, 188:62–79.

 Huang, Z., Wu, X., Garcia, A. J., Fik, T. J., and Tatem, A. J. (2013).

**An open-access modeled passenger flow matrix for the global air network in 2010.**




*PloS one*, 8(5):e64317.

 Ibraeva, A., de Almeida Correia, G. H., Silva, C., and Antunes, A. P. (2020).

**Transit-oriented development: A review of research achievements and challenges.**

*Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132:110–130.



-  Montoya, J. M., Pimm, S. L., and Solé, R. V. (2006).  
**Ecological networks and their fragility.**  
*Nature*, 442(7100):259–264.
-  Offner, J.-M. (1993).  
**Les «effets structurants» du transport: mythe politique, mystification scientifique.**  
*L'espace géographique*, pages 233–242.
-  Offner, J.-M., Beaucire, F., Delaplace, M., Frémont, A., Ninot, O., Bretagnolle, A., and Pumain, D. (2014).  
**Les effets structurants des infrastructures de transport.**  
*Espace géographique*, 43(1):p–51.



Raimbault, J. (2018).

*Caractérisation et modélisation de la co-évolution des réseaux de transport et des territoires.*

PhD thesis, Université Paris 7 Denis Diderot.



Raimbault, J. (2019).

**An urban morphogenesis model capturing interactions between networks and territories.**

In *The mathematics of urban morphology*, pages 383–409.

Springer.



Raimbault, J. (2020).

**Indirect evidence of network effects in a system of cities.**

*Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(1):138–155.



Raimbault, J. (2021a).

**Modeling the co-evolution of cities and networks.**

In *Handbook of Cities and Networks*. Edward Elgar Publishing.



Raimbault, J. (2021b).

**Urban sprawl and evolution of accessibility profiles in chinese cities.**

*arXiv preprint arXiv:2112.14319*.



Raimbault, J. and Le Néchet, F. (2021).

**Introducing endogenous transport provision in a luti model to explore polycentric governance systems.**




*Journal of Transport Geography*, 94:103115.



Rozenblat, C. (2021).

**Intracity and intercity networks of multinational firms, 2010-2019.**

In *Handbook of cities and networks*, pages 511–556. Edward Elgar Publishing.

-  Shaw, S.-L., Fang, Z., Lu, S., and Tao, R. (2014).  
**Impacts of high speed rail on railroad network accessibility in china.**  
*Journal of Transport Geography*, 40:112–122.
-  Sporns, O. (2011).  
**The human connectome: a complex network.**  
*Annals of the new York Academy of Sciences*, 1224(1):109–125.
-  Stopczynski, A., Sekara, V., Sapiezynski, P., Cuttone, A., Madsen, M. M., Larsen, J. E., and Lehmann, S. (2014).  
**Measuring large-scale social networks with high resolution.**  
*PloS one*, 9(4):e95978.



Watts, D. J. and Strogatz, S. H. (1998).  
**Collective dynamics of ‘small-world’ networks.**  
*nature*, 393(6684):440–442.



Wegener, M. and Fürst, F. (2004).  
**Land-use transport interaction: State of the art.**  
*Available at SSRN 1434678.*



Wu, H. and Levinson, D. (2020).  
**Unifying access.**  
*Transportation Research Part D: Transport and Environment*,  
83:102355.



Zahavi, Y. (1974).

**Traveltime budgets and mobility in urban areas.**

Technical report, United States. Federal Highway Administration.