



## Promenade dans les cartes de villes

Thomas Courtat

Sous la direction de S.Douady et C.Gloaguen



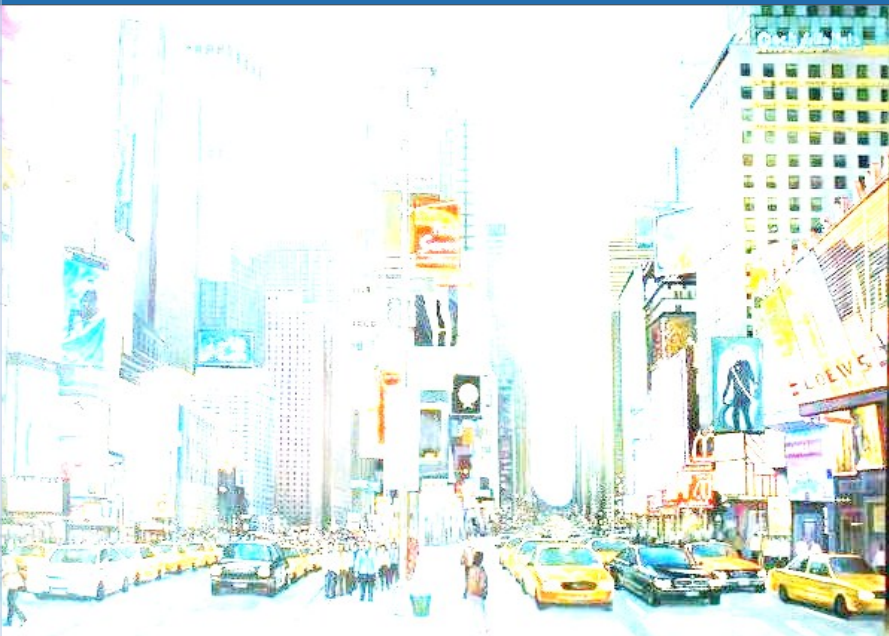
Orange Labs & CNRS Matière et Systèmes Complexes



31 Janvier 2012

# Introduction

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Introduction

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

**Urbanistes** : Comment décider d'une opération urbaine ?

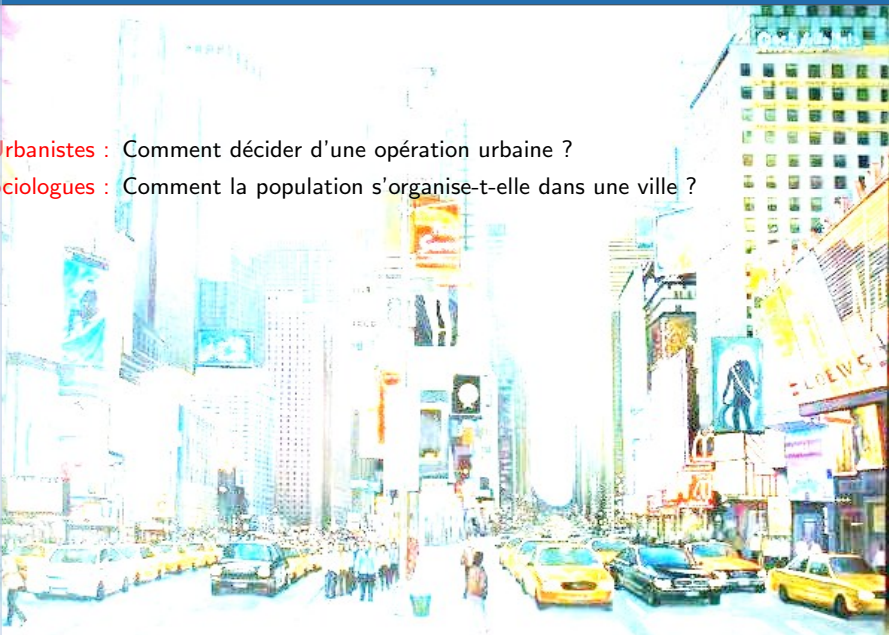


# Introduction

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

**Urbanistes** : Comment décider d'une opération urbaine ?

**Sociologues** : Comment la population s'organise-t-elle dans une ville ?



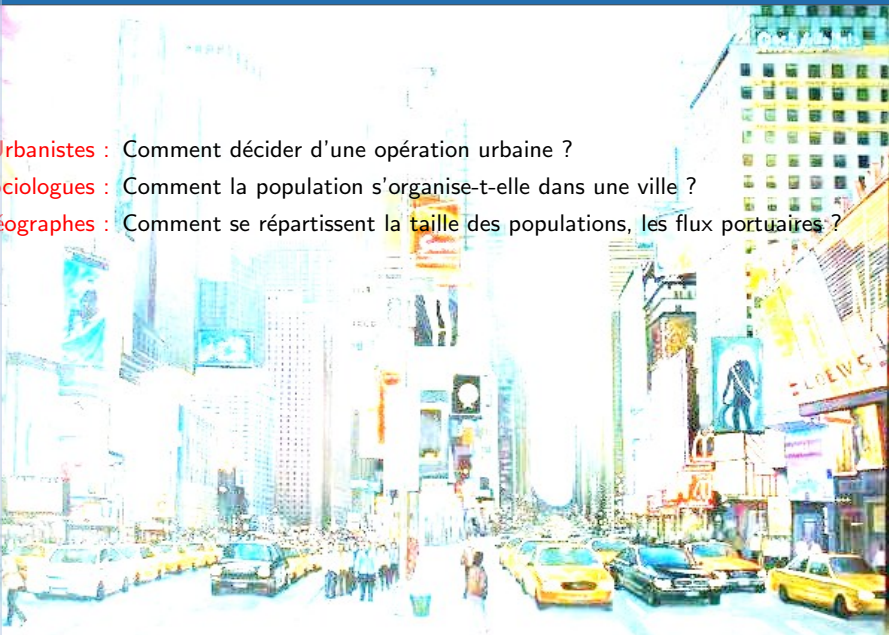
# Introduction

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

**Urbanistes** : Comment décider d'une opération urbaine ?

**Sociologues** : Comment la population s'organise-t-elle dans une ville ?

**Géographes** : Comment se répartissent la taille des populations, les flux portuaires ?



# Introduction

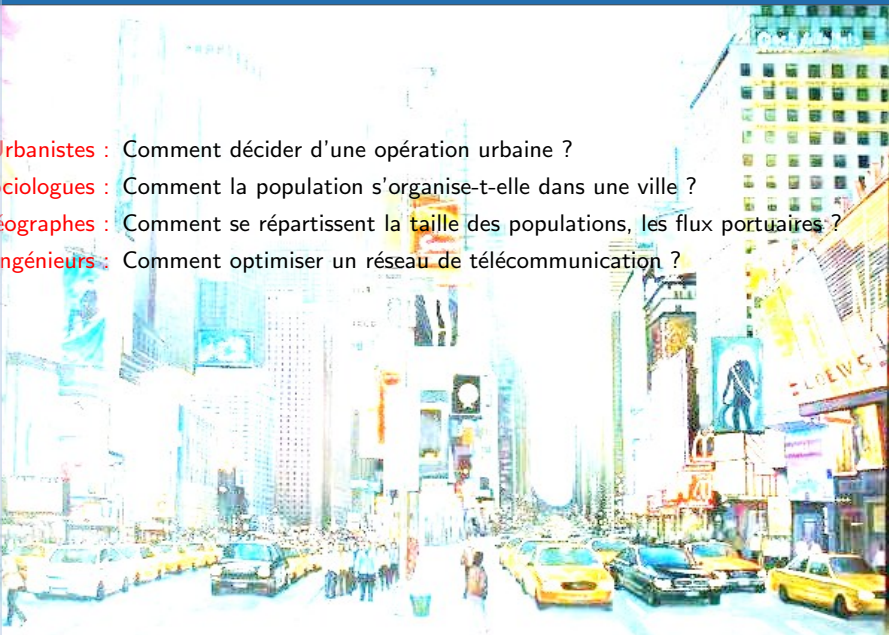
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

**Urbanistes** : Comment décider d'une opération urbaine ?

**Sociologues** : Comment la population s'organise-t-elle dans une ville ?

**Géographes** : Comment se répartissent la taille des populations, les flux portuaires ?

**Ingénieurs** : Comment optimiser un réseau de télécommunication ?



# Introduction

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

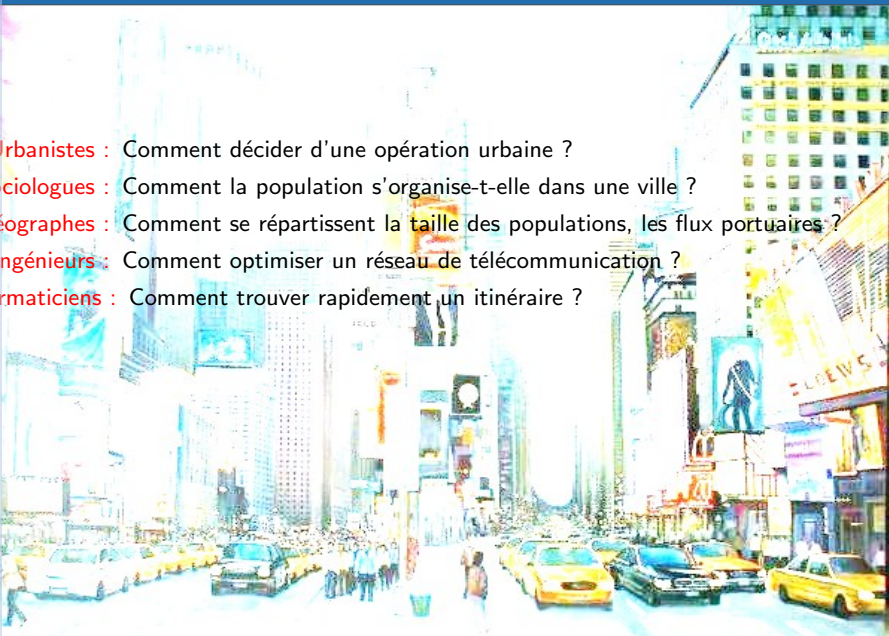
**Urbanistes** : Comment décider d'une opération urbaine ?

**Sociologues** : Comment la population s'organise-t-elle dans une ville ?

**Géographes** : Comment se répartissent la taille des populations, les flux portuaires ?

**Ingénieurs** : Comment optimiser un réseau de télécommunication ?

**Informaticiens** : Comment trouver rapidement un itinéraire ?



# Introduction

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

**Urbanistes** : Comment décider d'une opération urbaine ?

**Sociologues** : Comment la population s'organise-t-elle dans une ville ?

**Géographes** : Comment se répartissent la taille des populations, les flux portuaires ?

**Ingénieurs** : Comment optimiser un réseau de télécommunication ?

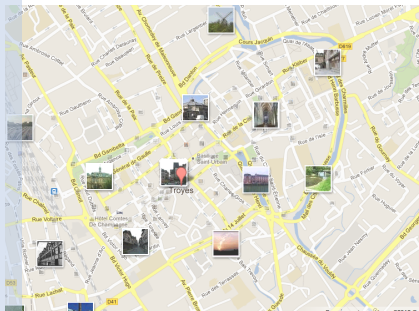
**Informaticiens** : Comment trouver rapidement un itinéraire ?

**Physiciens** : Comment comprendre et caractériser ce système complexe ?



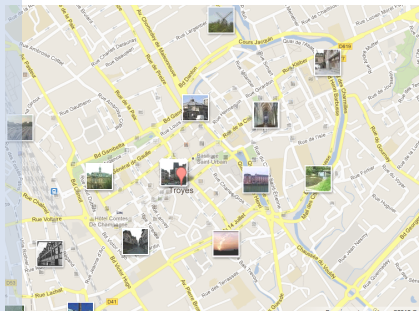
# Table des matières

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Table des matières

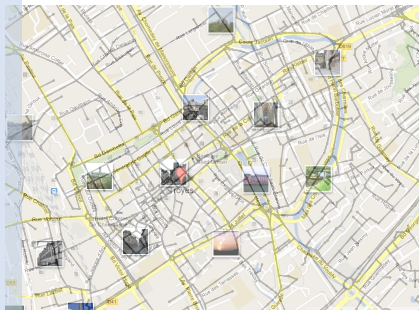
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



- Les données exhaustives sont coûteuses

# Table des matières

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



- Les données exhaustives sont coûteuses

# Table des matières

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



- Les données exhaustives sont coûteuses

# Table des matières

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



- Les données exhaustives sont coûteuses
- Quelle est la quantité d'information contenue dans le plan d'une ville ?

# Table des matières

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



- Les données exhaustives sont coûteuses
- Quelle est la quantité d'information contenue dans le plan d'une ville ?
- Dans quelle mesure la forme d'une ville est-elle déterminée par la dynamique de son plan ?

# Table des matières

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



- Les données exhaustives sont coûteuses
- Quelle est la quantité d'information contenue dans le plan d'une ville ?
- Dans quelle mesure la forme d'une ville est-elle déterminée par la dynamique de son plan ?

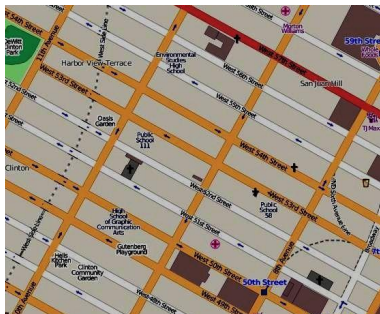
- 1 Principes qualitatifs
- 2 Graphes et réseaux complexes
- 3 Représentation mathématique
- 4 Applications
- 5 Modèles
- 6 Conclusion

# 1 Principes qualitatifs



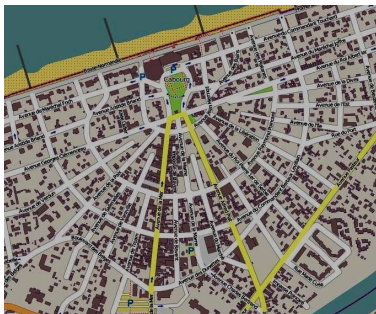
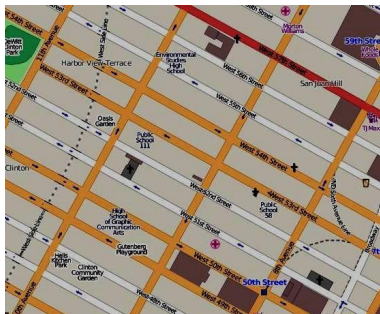
# Diversité des réseaux

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



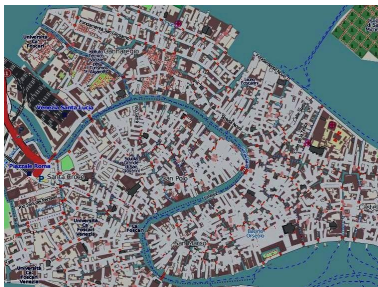
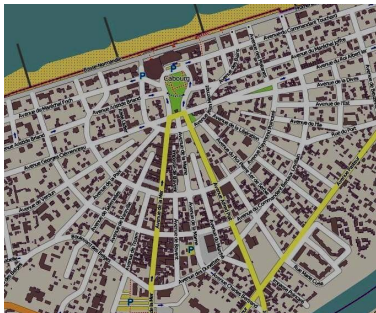
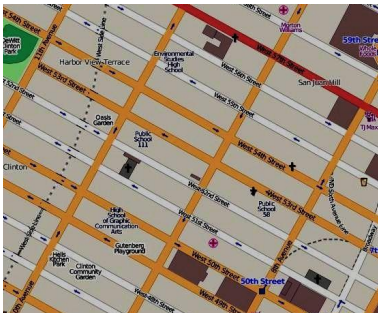
# Diversité des réseaux

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



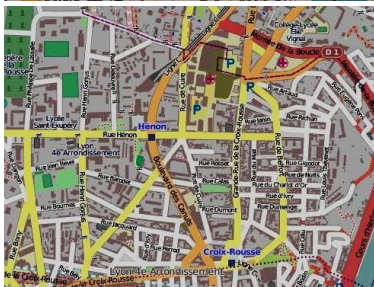
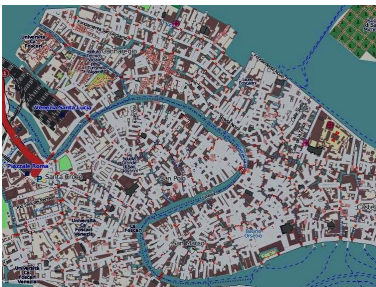
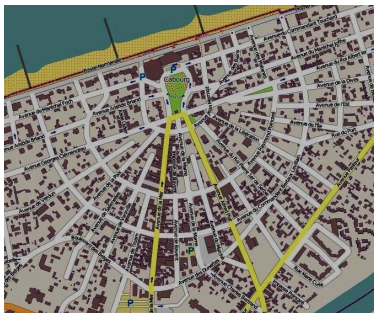
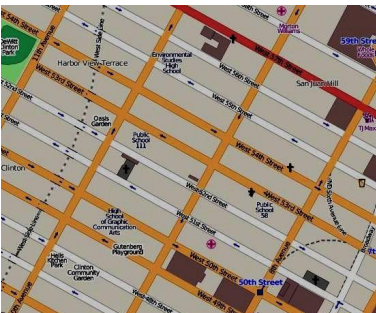
# Diversité des réseaux

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Diversité des réseaux

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Contraintes structurantes

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Contraintes structurantes

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



1 Perpendicularité aux éléments structurants

# Contraintes structurantes

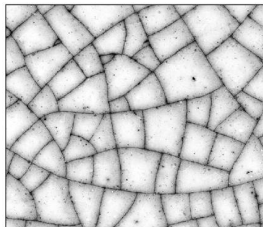
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



- 1 Perpendicularité aux éléments structurants
- 2 Alignement des axes

# Contraintes structurantes

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



- 1 Perpendicularité aux éléments structurants
- 2 Alignement des axes
- 3 Motifs de division

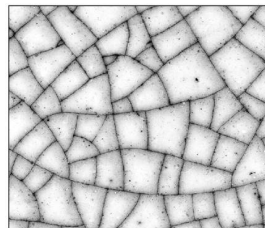


# Contraintes structurantes

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



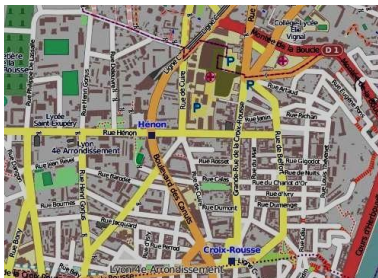
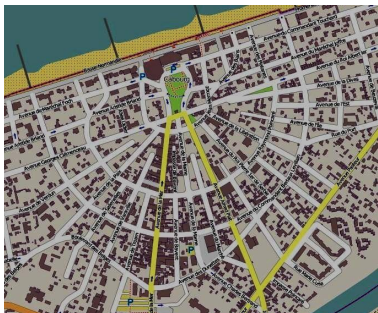
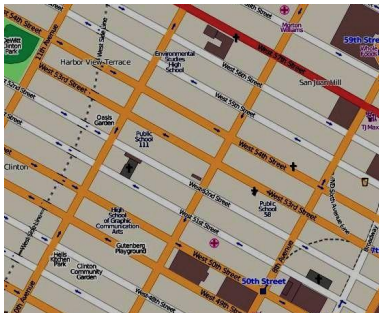
- 1 Perpendicularité aux éléments structurants
- 2 Alignement des axes
- 3 Motifs de division



⇒ Expression locale de règles d'optimalité ?

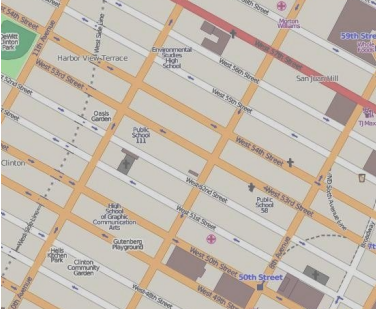
# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



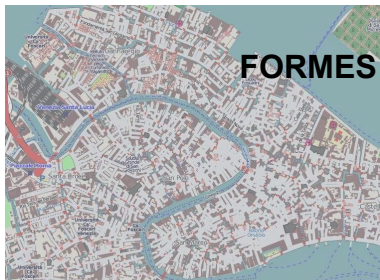
# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$

# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$



Forme planifiée

# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$



Forme planifiée



Forme organique

# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$



Forme planifiée



Forme organique



# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$



Forme planifiée



Forme organique

# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$



Forme planifiée



Forme organique

# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$



Forme planifiée



Forme organique

# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$



Forme planifiée



Forme organique

# Croissance planifiée et croissance organique

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Placer  $N$  marchands de glace sur une plage de longueur  $L$  pour que la distance parcourue par les gens soit minimale:

$$\{X_i\}_{i \leq N} = \operatorname{argmin} \int_0^L \min(y, X_i) dy$$



Forme planifiée

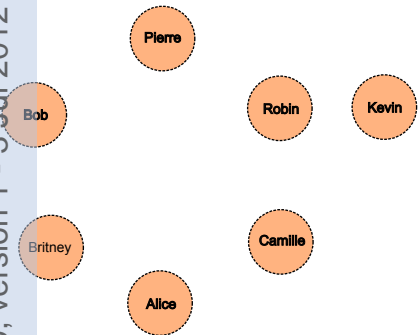


Forme organique

# 2 Graphes et réseaux complexes

# Graphe

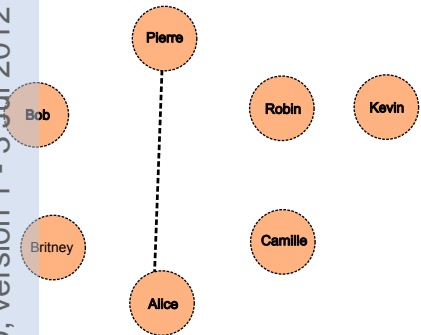
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



## Définitions

# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

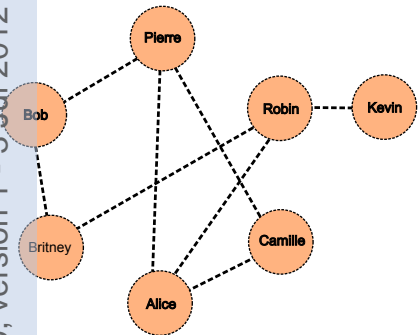


## Définitions



# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



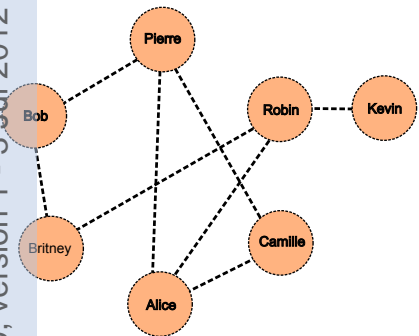
## Définitions

$$G = (V, E)$$

- $V =$  sommets /  $E =$  arêtes

# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



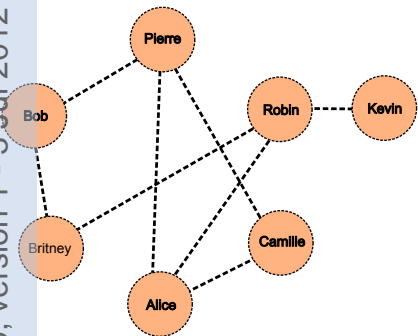
## Définitions

$$G = (V, E)$$

- $V =$  sommets /  $E =$  arêtes
- Taille:  $\#V$

# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



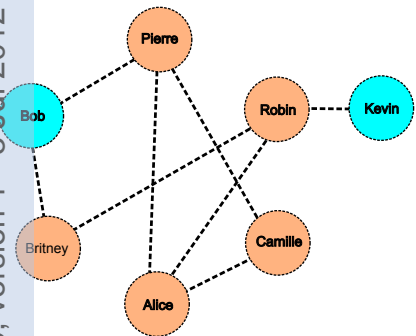
## Définitions

$$G = (V, E)$$

- $V =$  sommets /  $E =$  arêtes
- Taille:  $\#V$
- Degré d'un sommet: nombre d'arêtes incidentes

# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



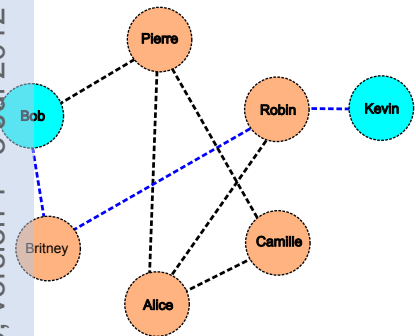
## Définitions

$$G = (V, E)$$

- $V =$  sommets /  $E =$  arêtes
- Taille:  $\#V$
- Degré d'un sommet: nombre d'arêtes incidentes
- Chemin

# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



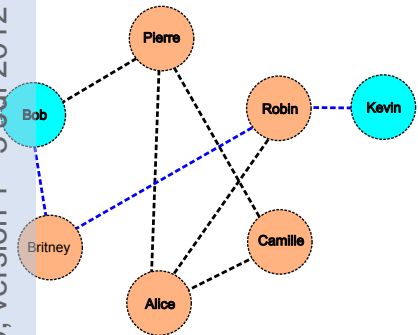
## Définitions

$$G = (V, E)$$

- $V =$  sommets /  $E =$  arêtes
- Taille:  $\#V$
- Degré d'un sommet: nombre d'arêtes incidentes
- Chemin
- Distance:  $d(.,.)$

# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



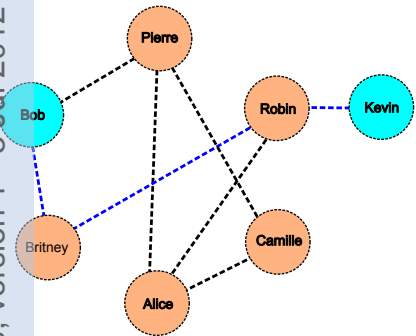
## Définitions

$$G = (V, E)$$

- $V =$  sommets /  $E =$  arêtes
- Taille:  $\#V$
- Degré d'un sommet: nombre d'arêtes incidentes
- Chemin
- Distance:  $d(.,.)$ 
  - Topologique:  $d^t(.,.)$

# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



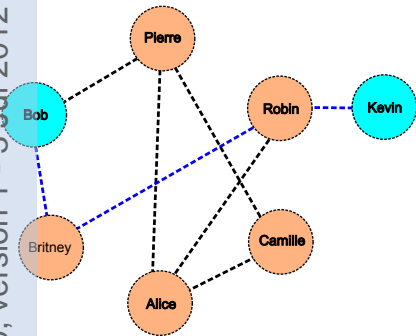
## Définitions

$$G = (V, E)$$

- $V =$  sommets /  $E =$  arêtes
- Taille:  $\#V$
- Degré d'un sommet: nombre d'arêtes incidentes
- Chemin
- Distance:  $d(.,.)$ 
  - Topologique:  $d^t(.,.)$
  - Métrique:  $d^m(.,.)$

# Graphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



## Définitions

$$G = (V, E)$$

- $V =$  sommets /  $E =$  arêtes
- Taille:  $\#V$
- Degré d'un sommet: nombre d'arêtes incidentes
- Chemin
- Distance:  $d(.,.)$ 
  - Topologique:  $d^t(.,.)$
  - Métrique:  $d^m(.,.)$

## Distance Moyenne

$$D(v_0) = \frac{1}{\#V} \sum_{v \in V} d(v, v_0)$$

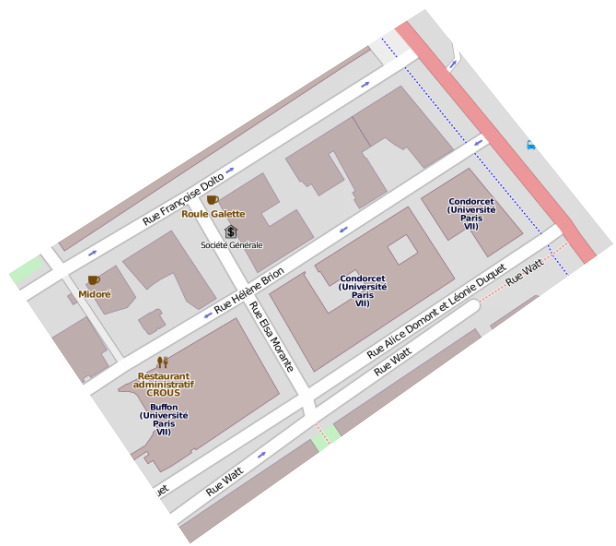
$$\langle D \rangle = \frac{1}{\#V^2} \sum_{v_1, v_2 \in V} d(v_1, v_2)$$





# Graphes et réseaux complexes - Représentation classique des plans de villes

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Graphes et réseaux complexes - Représentation classique des plans de villes

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Graphes et réseaux complexes - Représentation classique des plans de villes

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Statistiques des graphes de ville

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Étude statistique des réseaux de rues:

- Lois d'échelle (Barthelemy2008)
- Diversité des facteurs de forme (Lammer2006)
- Relations coût - efficacité (Buhl2006)
- Distribution des degrés (Buhl2006, Cardillo2006)



La surface des blocs suit une loi de puissance  $\mathbb{P}(A) \sim A^{-\alpha}$  avec  $\alpha \simeq 1.9$  (Lammer2006)

# Statistiques des graphes de ville

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Etude statistique des réseaux de rues:

- Lois d'échelle (Barthelemy2008)
- Diversité des facteurs de forme (Lammer2006)
- Relations coût - efficacité (Buhl2006)
- Distribution des degrés (Buhl2006, Cardillo2006)



aire des blocs suit une loi de puissance  $\mathbb{P}(A) \sim A^{-\alpha}$  avec  $\alpha \simeq 1.9$  (Lammer2006)

- Pas de propriétés remarquables (Barthelemy2010, Boccaletta2006)...

# Statistiques des graphes de ville

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Etude statistique des réseaux de rues:

- Lois d'échelle (Barthelemy2008)
- Diversité des facteurs de forme (Lammer2006)
- Relations coût - efficacité (Buhl2006)
- Distribution des degrés (Buhl2006, Cardillo2006)



aire des blocs suit une loi de puissance  $\mathbb{P}(A) \sim A^{-\alpha}$  avec  $\alpha \simeq 1.9$  (Lammer2006)

- Pas de propriétés remarquables (Barthelemy2010, Boccaletta2006)...
- Reintroduction de la géométrie

# Statistiques des graphes de ville

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Etude statistique des réseaux de rues:

- Lois d'échelle (Barthelemy2008)
- Diversité des facteurs de forme (Lammer2006)
- Relations coût - efficacité (Buhl2006)
- Distribution des degrés (Buhl2006, Cardillo2006)



La surface des blocs suit une loi de puissance  $\mathbb{P}(A) \sim A^{-\alpha}$  avec  $\alpha \simeq 1.9$  (Lammer2006)

- Pas de propriétés remarquables (Barthelemy2010, Boccaletta2006)...
- Reintroduction de la géométrie
- Structure géométrique remarquable: la rue (contre le segment de rue)



3

# Représentation mathématique

# Graphe géométrique et Graphe droit

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Graphe géométrique et Graphe droit

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012









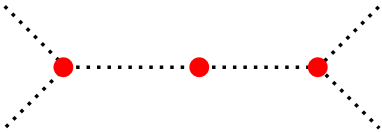
# Graphe géométrique et Graphe droit

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Opérateur intégral

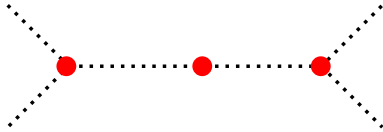
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012





# Opérateur intégral

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

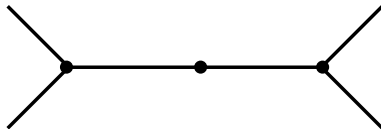


The diagram shows a path graph with three red nodes connected by four dotted edges. The edges extend outwards from the nodes, suggesting a larger graph structure.

$$\langle D^m \rangle = \frac{1}{\#V^2} \sum_{v_1, v_2 \in V} d^m(v_1, v_2)$$

## Opérateur intégral

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

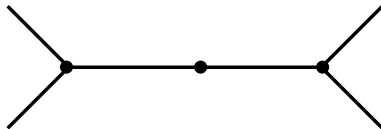


$$\langle D^m \rangle = \frac{1}{\#V^2} \sum_{v_1, v_2 \in V} d^m(v_1, v_2)$$

$$\langle D^m \rangle_{C^0} = \frac{1}{L^2} \iint_G d^m(x, y) d\mu_G(x) d\mu_G(y)$$

## Opérateur intégral

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

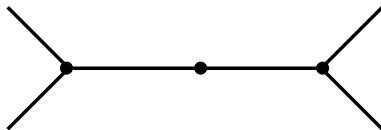


$$\langle D^m \rangle = \frac{1}{\#V^2} \sum_{v_1, v_2 \in V} d^m(v_1, v_2) = \frac{5}{9}L$$

$$\langle D^m \rangle_{C^0} = \frac{1}{L^2} \iint_G d^m(x, y) d\mu_G(x) d\mu_G(y)$$

## Opérateur intégral

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



$$\langle D^m \rangle = \frac{1}{\#V^2} \sum_{v_1, v_2 \in V} d^m(v_1, v_2) = \frac{5}{9}L$$

$$\langle D^m \rangle_{C^0} = \frac{1}{L^2} \iint d^m(x, y) d\mu_G(x) d\mu_G(y) = \frac{1}{12}L$$











# Hypergraphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

## Définition

"Graphe dont les arêtes peuvent contenir plusieurs sommets"



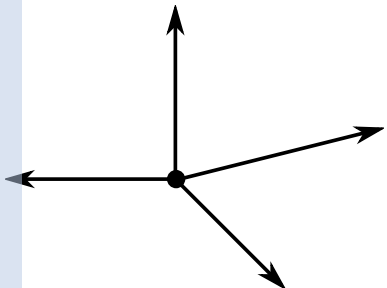
Si  $G = (V, E)$  est un graphe et  $\mathcal{R}$  une relation d'équivalence sur  $E$ ,  $H = (V, E/\mathcal{R})$  est un hypergraphe.  
"Ces segments font partie de la même rue"

$\hat{\mathcal{R}}$  une relation locale à une intersection, on peut la propager à l'ensemble du graphe en une relation  $\mathcal{R}$  globale.

- Représenter les rues par un hypergraphe
- Retrouver automatiquement les rues
  - Relation locale simple
  - Algorithme de propagation (fermeture transitive)

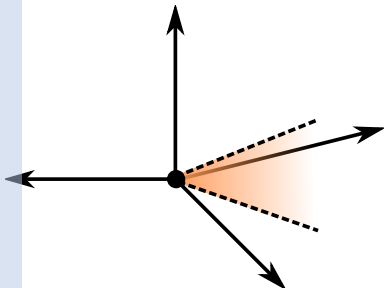
# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Hypergraphe - Relations locales

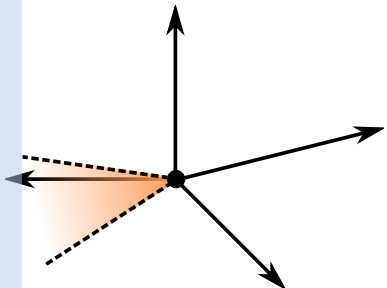
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.

# Hypergraphe - Relations locales

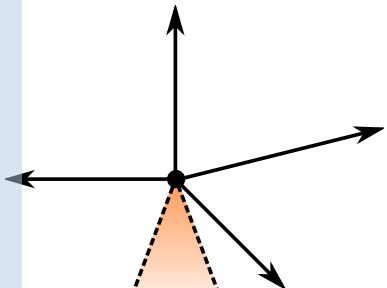
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.

# Hypergraphe - Relations locales

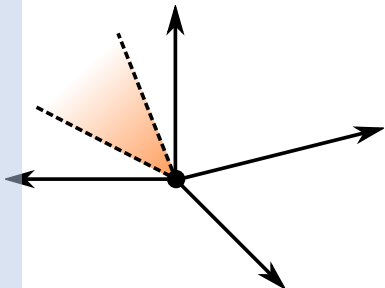
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.

# Hypergraphe - Relations locales

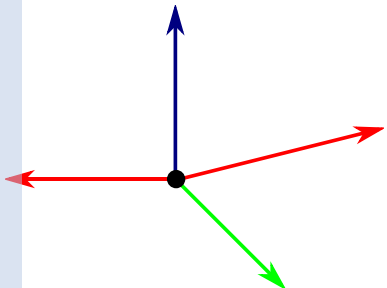
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.

# Hypergraphe - Relations locales

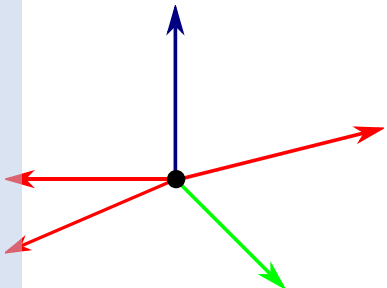
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.

# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

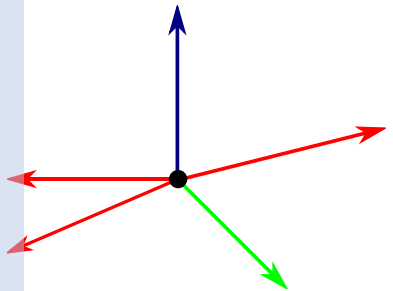


Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.

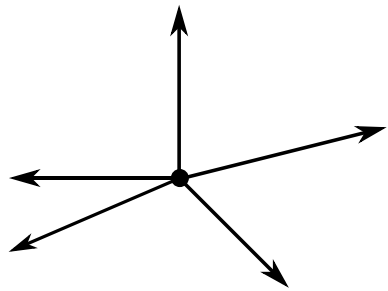


# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



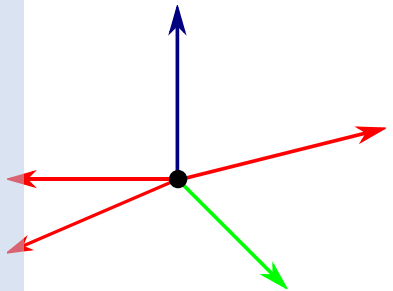
Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.



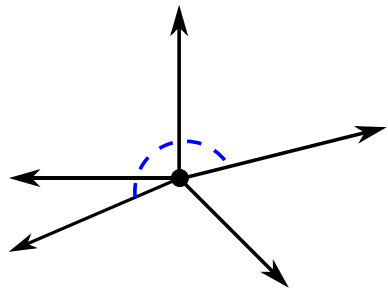
Minimiser la torsion à l'intersection.

# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



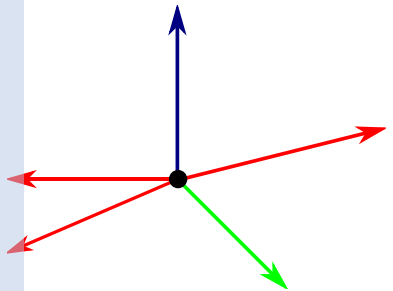
Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.



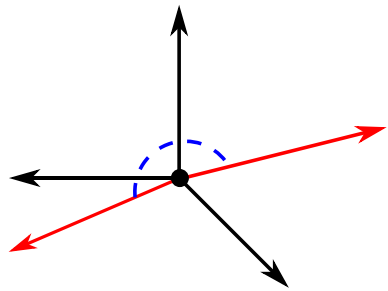
Minimiser la torsion à l'intersection.

# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



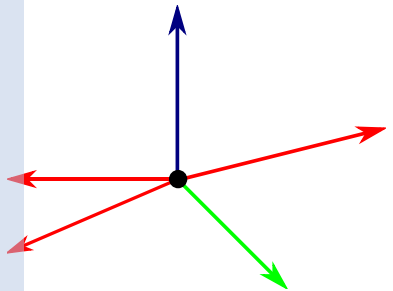
Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.



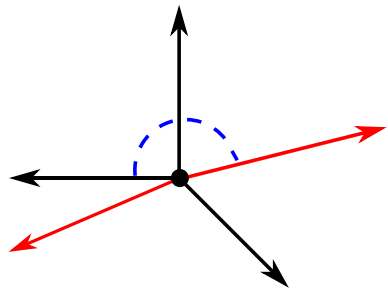
Minimiser la torsion à l'intersection.

# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



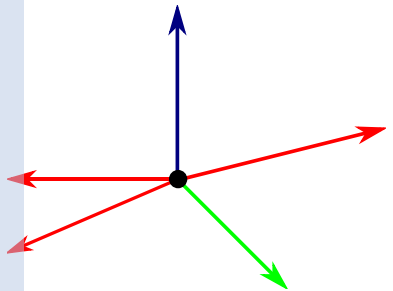
Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.



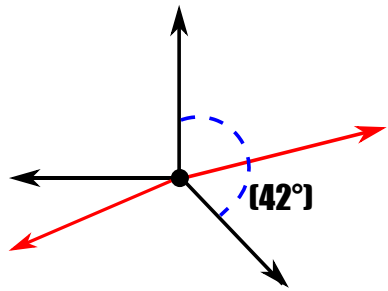
Minimiser la torsion à l'intersection.

# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



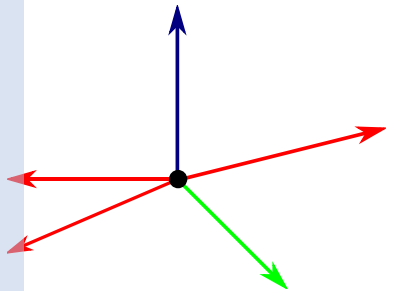
Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.



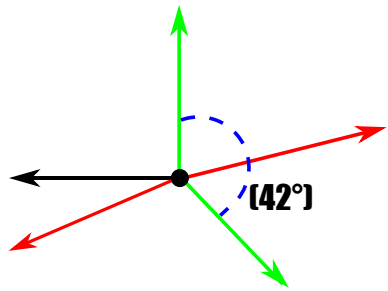
Minimiser la torsion à l'intersection.

# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



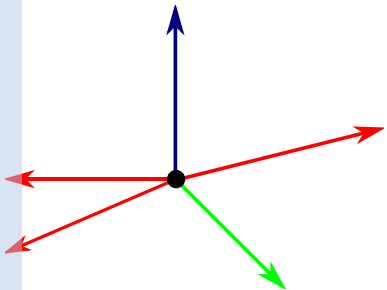
Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.



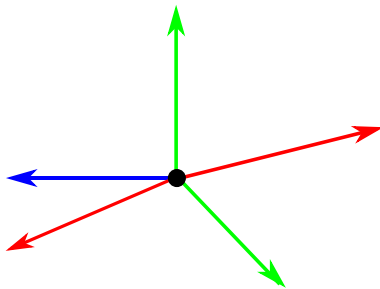
Minimiser la torsion à l'intersection.

# Hypergraphe - Relations locales

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



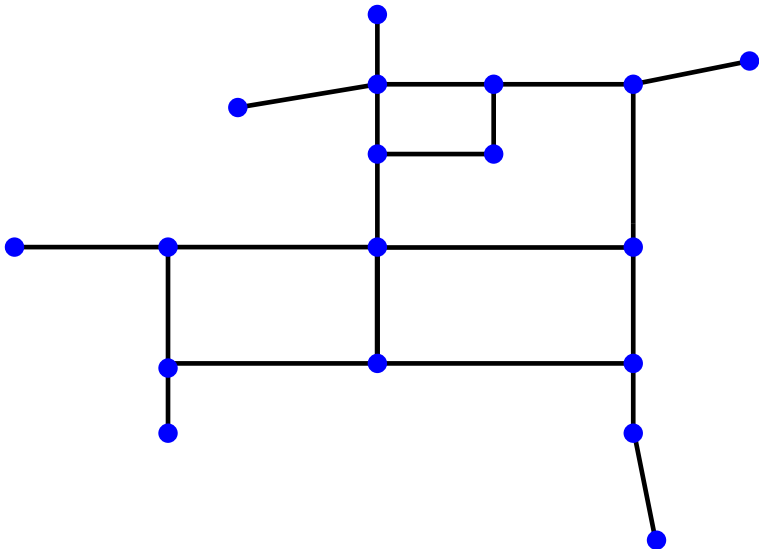
Deux arêtes sont en relation locale si elles font un angle inférieur à un seuil.



Minimiser la torsion à l'intersection.

# Hypergraphe - Propagation

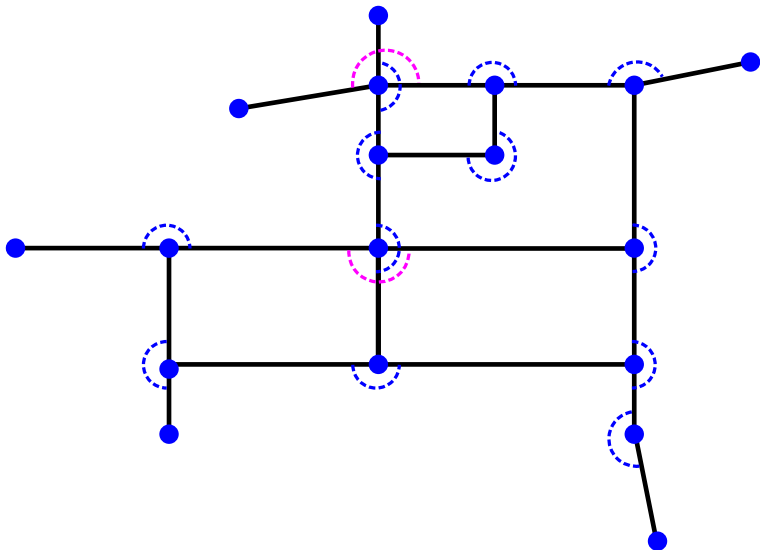
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012





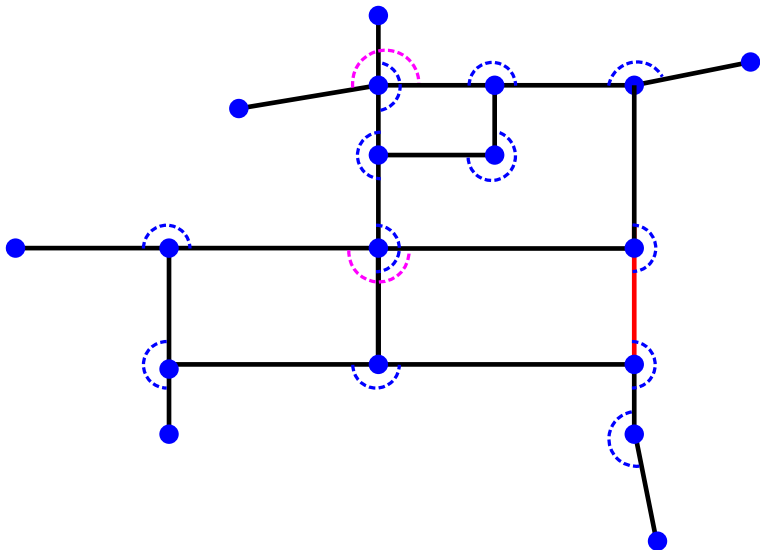
# Hypergraphe - Propagation

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



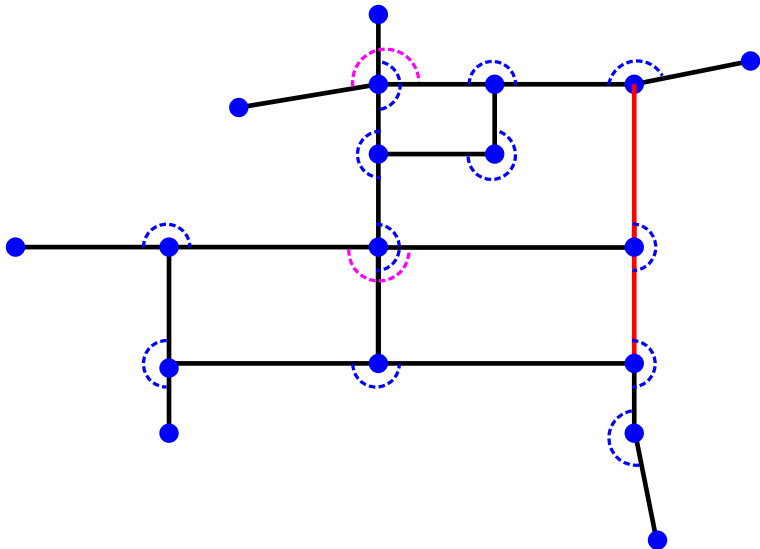
# Hypergraphe - Propagation

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



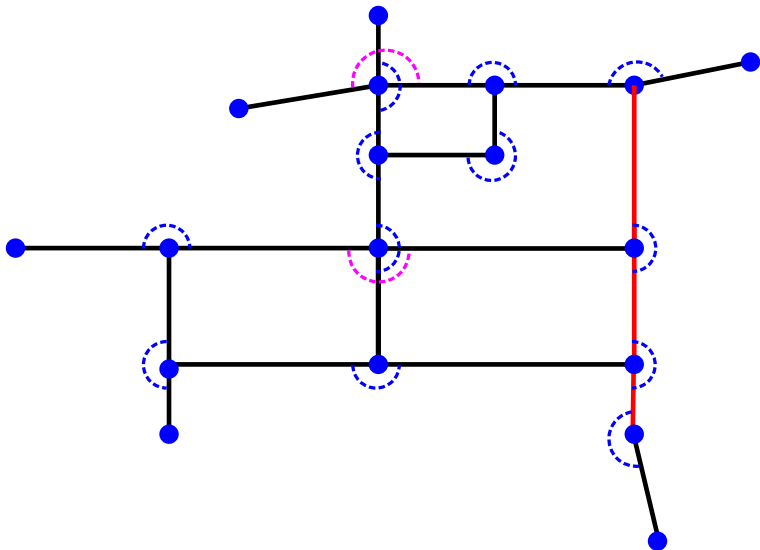
# Hypergraphe - Propagation

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



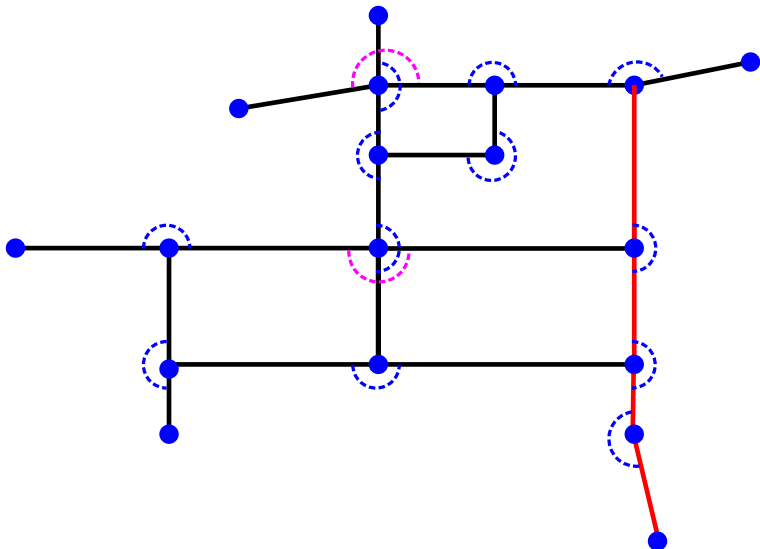
# Hypergraphe - Propagation

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



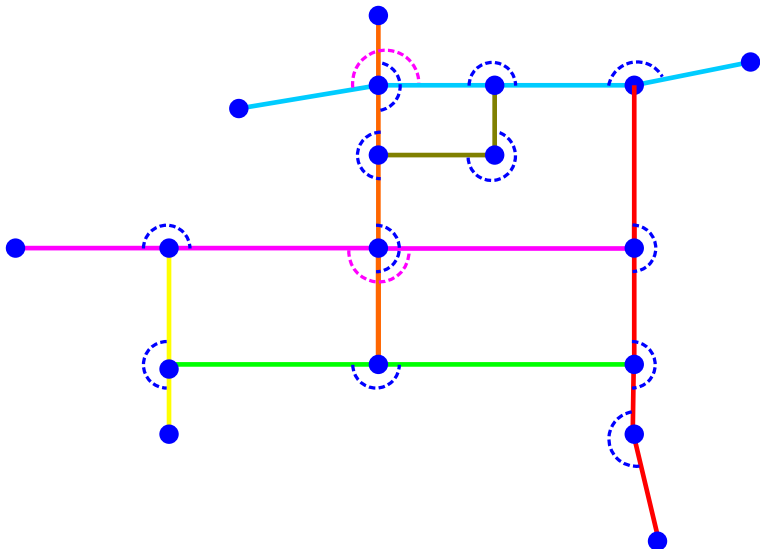
# Hypergraphe - Propagation

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Hypergraphe - Propagation

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Hypergraphe - Performances

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Le résultat ne dépend pas du point de départ

# Hypergraphe - Performances

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Le résultat ne dépend pas du point de départ
- Complexité en  $O(\#V)$



# Hypergraphe - Performances

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Le résultat ne dépend pas du point de départ
- Complexité en  $O(\#V)$
- Moins de 1% de branches

# Hypergraphe - Performances

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

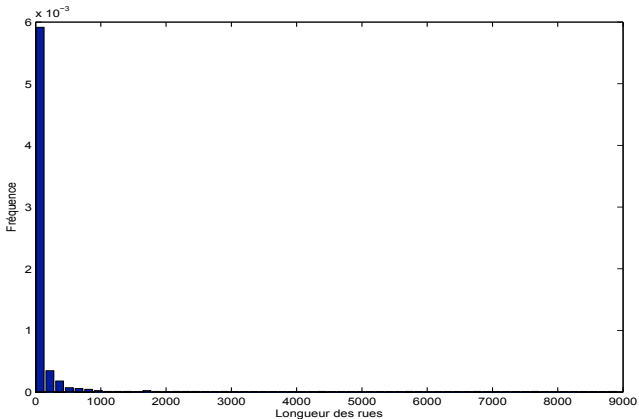
- Le résultat ne dépend pas du point de départ
- Complexité en  $O(\#V)$
- Moins de 1% de branches
- Retrouve le "vrai" nombre de rues à 20%

# Distribution de la longueur des rues

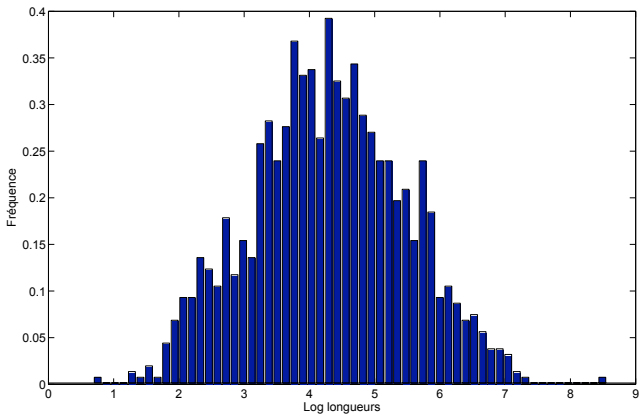
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

# Distribution de la longueur des rues

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

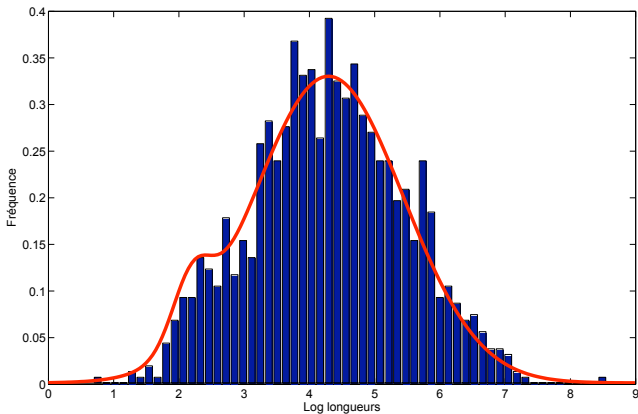


# Distribution de la longueur des rues



■ Echelle logarithmique

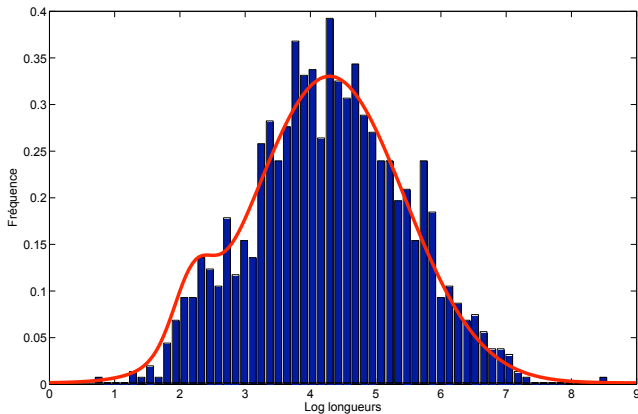
## Distribution de la longueur des rues



- Echelle logarithmique
- Plusieurs modes

## Distribution de la longueur des rues

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

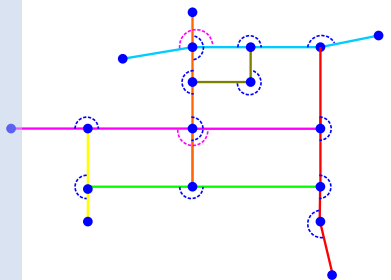


- Echelle logarithmique
- Plusieurs modes

- Mélange de lois log-normales
- Hypothèse testée sur 109 villes

# Topologie de l'hypergraphe

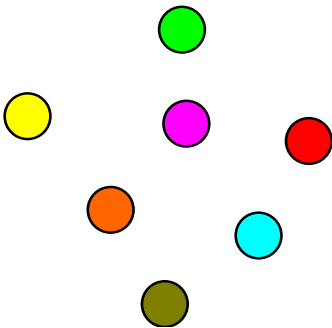
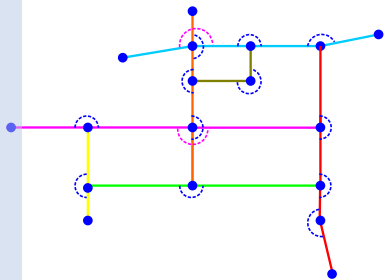
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012





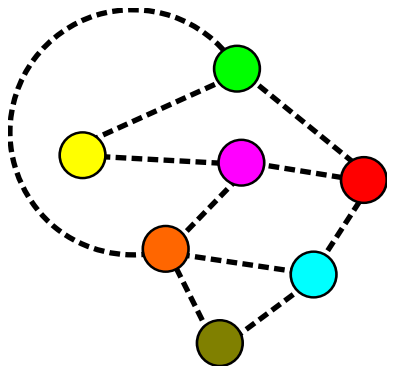
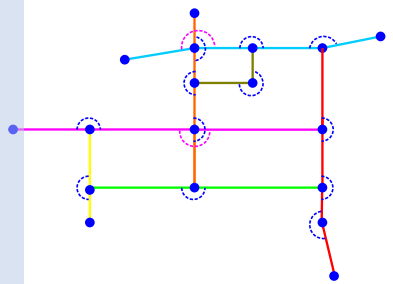
# Topologie de l'hypergraphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



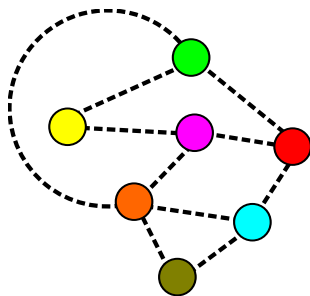
# Topologie de l'hypergraphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Topologie de l'hypergraphe

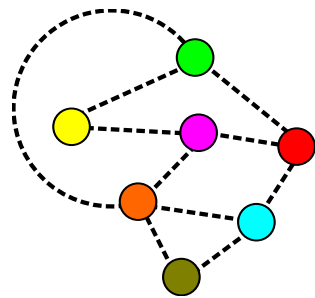
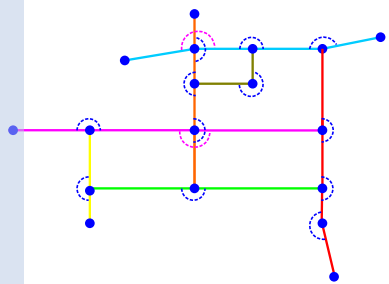
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



$$D(h_0) = \frac{1}{\#H} \sum_{h \in H} d(h, h_0)$$

# Topologie de l'hypergraphe

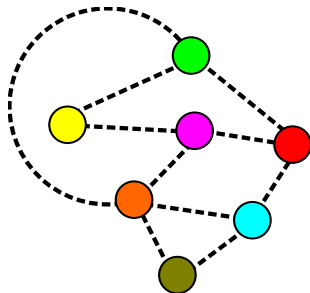
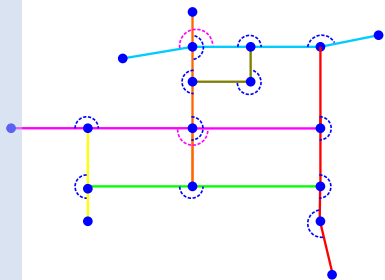
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

# Topologie de l'hypergraphe

tel-000714310, version 1 - 3 Jul 2012



$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

## Distance au plus simple

$$d^s(x, y) \hat{=} d(h_x, h_y) + 1, \quad (0 \text{ si } x = y)$$

$$D(x \in h_x) = \frac{1}{\mu_G(G)} \int_G d^s(x, y) d\mu_G(y) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| (d(h_0, h) + 1)$$

# Topologie de l'hypergraphe

$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

# Topologie de l'hypergraphe

$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

$$\langle D \rangle = \frac{1}{L^2} \sum \|h_1\| \|h_2\| d(h_1, h_2)$$

# Topologie de l'hypergraphe

$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

$$\langle D \rangle = \frac{1}{L^2} \sum \|h_1\| \|h_2\| d(h_1, h_2)$$

$$\text{diam} = \max_{h_1, h_2 \in H} d(h_1, h_2)$$



# Topologie de l'hypergraphe

$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

$$\langle D \rangle = \frac{1}{L^2} \sum \|h_1\| \|h_2\| d(h_1, h_2)$$

$$diam = \max_{h_1, h_2 \in H} d(h_1, h_2)$$

$$Centre = \operatorname{argmin}_{h \in H} D(h)$$

# Topologie de l'hypergraphe

$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

$$\langle D \rangle = \frac{1}{L^2} \sum \|h_1\| \|h_2\| d(h_1, h_2)$$

$$diam = \max_{h_1, h_2 \in H} d(h_1, h_2)$$

$$Centre = \operatorname{argmin}_{h \in H} D(h)$$

$$r = \max_{h \in H} d(h, Centre)$$

# Topologie de l'hypergraphe

$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

$$\langle D \rangle = \frac{1}{L^2} \sum \|h_1\| \|h_2\| d(h_1, h_2)$$

$$diam = \max_{h_1, h_2 \in H} d(h_1, h_2)$$

$$Centre = \operatorname{argmin}_{h \in H} D(h)$$

$$r = \max_{h \in H} d(h, Centre)$$

$$r \leq \langle D \rangle \leq diam \leq 2.r$$

# Topologie de l'hypergraphe

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

$$D(h_0) = \frac{1}{L} \sum_{h \in H} \|h\| d(h, h_0)$$

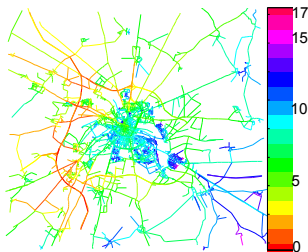
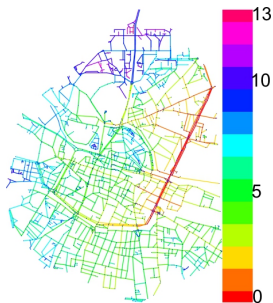
$$\langle D \rangle = \frac{1}{L^2} \sum_{h_1, h_2 \in H} \|h_1\| \|h_2\| d(h_1, h_2)$$

$$diam = \max_{h_1, h_2 \in H} d(h_1, h_2)$$

$$Centre = \operatorname{argmin}_{h \in H} D(h)$$

$$r = \max_{h \in H} d(h, Centre)$$

$$r \leq \langle D \rangle \leq diam \leq 2.r$$



# C'est un petit monde !

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

ix degrés de séparation ...

Longueur moyenne d'un chemin dans un graphe  $\ll$  Taille du graphe

# C'est un petit monde !

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

ix degrés de séparation ...

Longueur moyenne d'un chemin dans un graphe  $\ll$  Taille du graphe

$$\langle D \rangle_t \leq O(\log L_t) \text{ Pour une système en évolution}$$

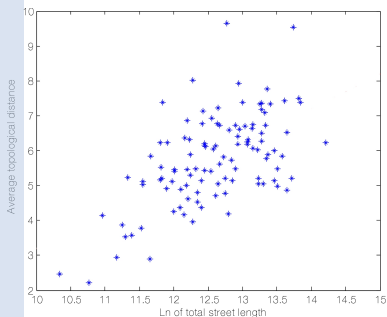
# C'est un petit monde !

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

$k$  degrés de séparation ...

Longueur moyenne d'un chemin dans un graphe  $\ll$  Taille du graphe

$$\langle D \rangle_n \leq O(\log L_n) \text{ Pour une collection de systèmes}$$



# C'est un petit monde !

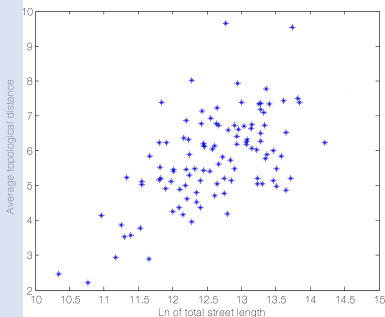
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

ix degrés de séparation ...

Longueur moyenne d'un chemin dans un graphe  $\ll$  Taille du graphe

$\langle D \rangle_n \leq O(\log L_n)$  Pour une collection de systèmes

$$\langle D^{sim} \rangle(L, \text{forme}) = 1. \log \frac{L}{L_0} + \Delta(\text{forme}), \quad L_0 = 0.905 \text{ km}$$





# C'est un petit monde !

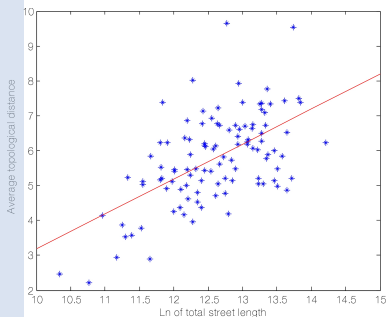
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

$k$  degrés de séparation ...

Longueur moyenne d'un chemin dans un graphe  $\ll$  Taille du graphe

$\langle D \rangle_n \leq O(\log L_n)$  Pour une collection de systèmes

$$\langle D^{sim} \rangle(L, \text{forme}) = 1. \log \frac{L}{L_0} + \Delta(\text{forme}), \quad L_0 = 0.905 \text{ km}$$



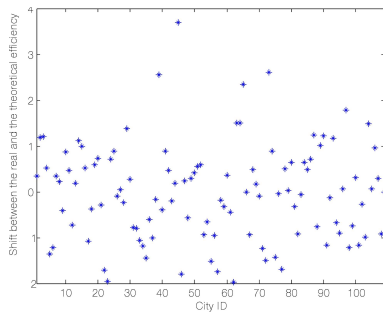
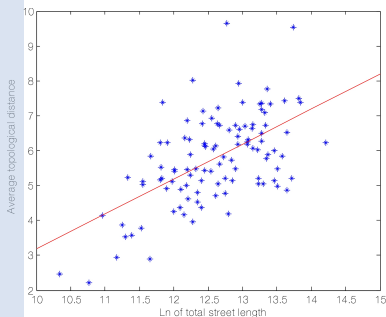
## C'est un petit monde !

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

ix degrés de séparation ...

Longueur moyenne d'un chemin dans un graphe  $\ll$  Taille du graphe $\langle D \rangle_n \leq O(\log L_n)$  Pour une collection de systèmes

$$\langle D^{sim} \rangle(L, \text{forme}) = 1. \log \frac{L}{L_0} + \Delta(\text{forme}), \quad L_0 = 0.905 \text{ km}$$



# C'est un petit monde !

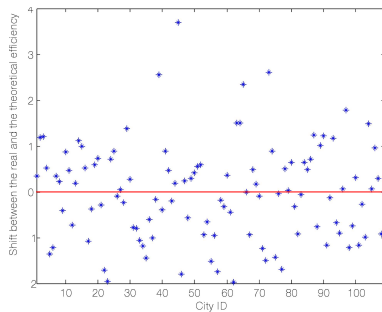
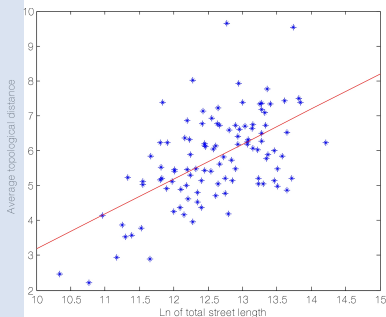
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

ix degrés de séparation ...

Longueur moyenne d'un chemin dans un graphe  $\ll$  Taille du graphe

$\langle D \rangle_n \leq O(\log L_n)$  Pour une collection de systèmes

$$\langle D^{sim} \rangle(L, \text{forme}) = 1. \log \frac{L}{L_0} + \Delta(\text{forme}), \quad L_0 = 0.905 \text{ km}$$



# C'est un petit monde !

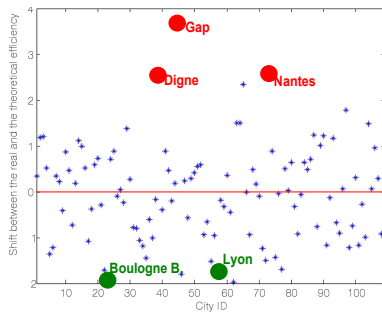
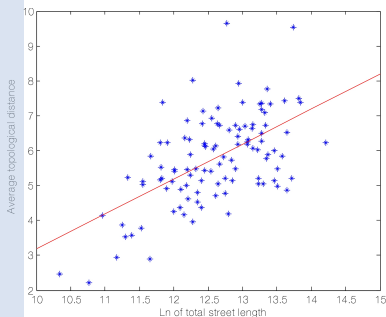
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

ix degrés de séparation ...

Longueur moyenne d'un chemin dans un graphe  $\ll$  Taille du graphe

$\langle D \rangle_n \leq O(\log L_n)$  Pour une collection de systèmes

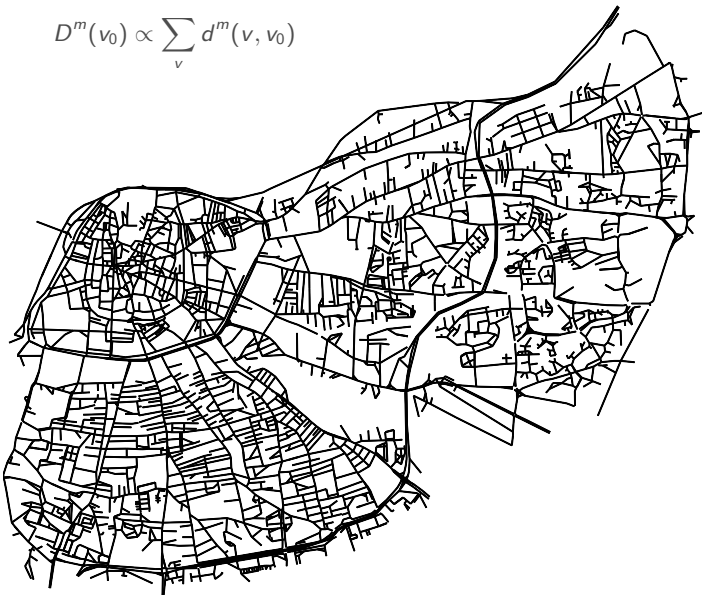
$$\langle D^{sim} \rangle(L, \text{forme}) = 1. \log \frac{L}{L_0} + \Delta(\text{forme}), \quad L_0 = 0.905 \text{ km}$$



# 4 Applications

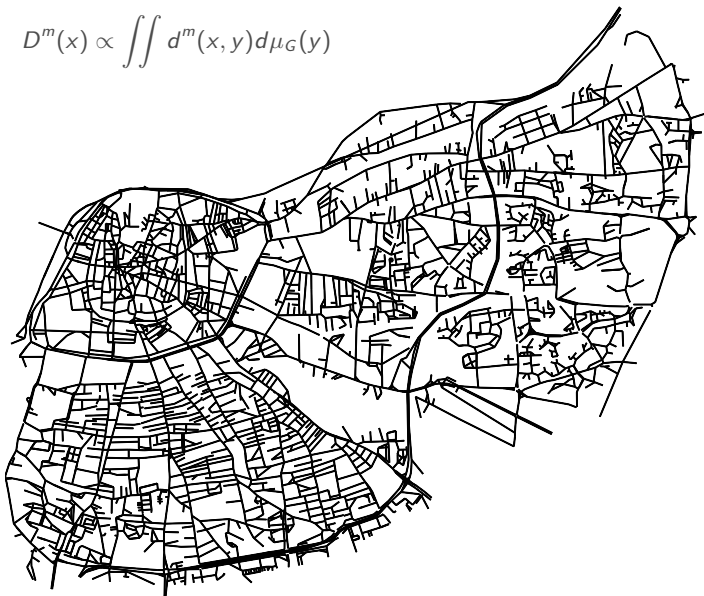
# Analyse de cartes - Closeness

$$D^m(v_0) \propto \sum_v d^m(v, v_0)$$



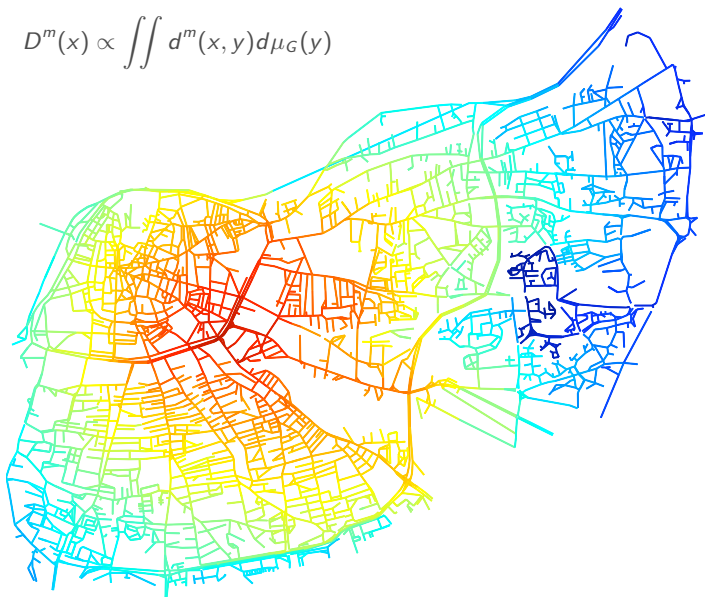
## Analyse de cartes - Closeness

$$D^m(x) \propto \iint d^m(x, y) d\mu_G(y)$$



## Analyse de cartes - Closeness

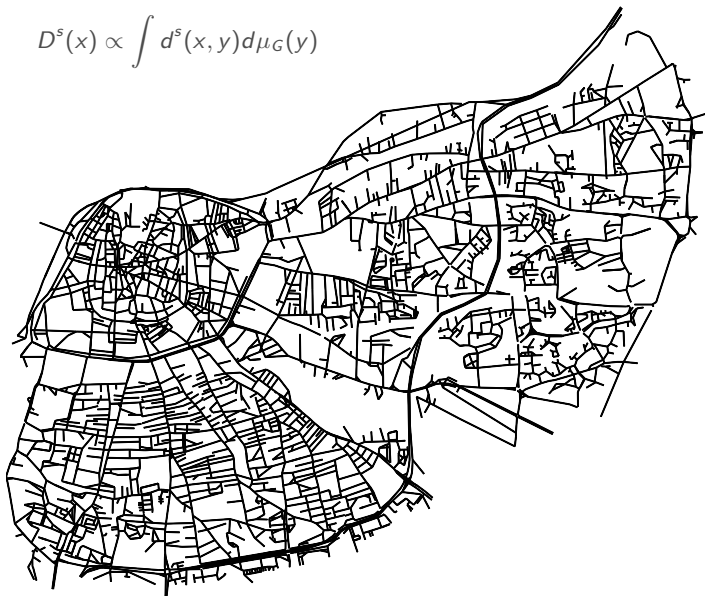
$$D^m(x) \propto \iint d^m(x, y) d\mu_G(y)$$





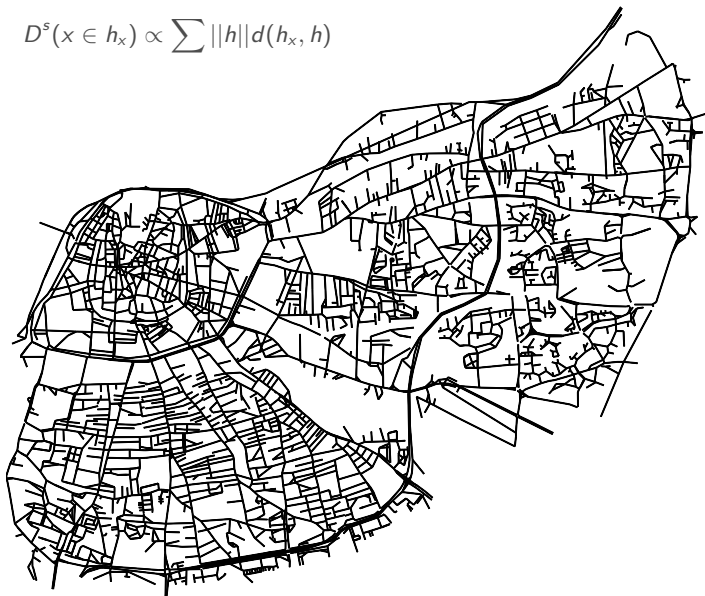
## Analyse de cartes - Centralité Simple

$$D^s(x) \propto \int d^s(x,y) d\mu_G(y)$$



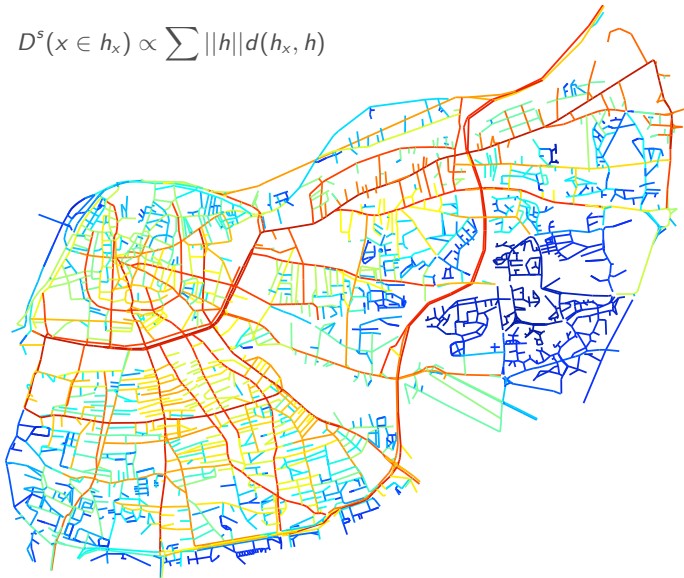
## Analyse de cartes - Centralité Simple

$$D^s(x \in h_x) \propto \sum ||h|| d(h_x, h)$$



## Analyse de cartes - Centralité Simple

$$D^s(x \in h_x) \propto \sum ||h|| d(h_x, h)$$



# Temps de calcul

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Graphe pondéré: Floyd - Warshall

Point à tous les autres:  $O(\#V^2)$

Point à point:  $O(\#V^2)$

Tous les couples:  $O(\#V^3)$

Améliorations:  $O(\#V^2 \log \#V)$

Graphe non pondéré: Exploration des voisinages

Point à tous les autres:  $O(\#V)$

Point à point:  $O(\#V)$

Dans un petit monde:  $O(\log \#V)$

Tous les couples:  $O(\#V^2)$

# Temps de calcul

tel-00714310 version 1 - 3 Jul 2012

Graphes pondérés: Floyd - Warshall

Point à tous les autres:  $O(\#V^2)$

Point à point:  $O(\#V^2)$

Tous les couples:  $O(\#V^3)$

Améliorations:  $O(\#V^2 \log \#V)$

Graphes non pondérés: Exploration des voisinages

Point à tous les autres:  $O(\#V)$

Point à point:  $O(\#V)$

Dans un petit monde:  $O(\log \#V)$

Tous les couples:  $O(\#V^2)$

Centralités

Closeness :  $O(\#V^2 \log \#V)$

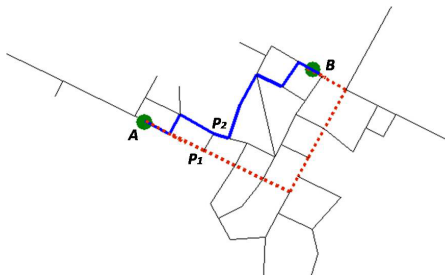
Centralité simple :  $O(\#V) + O(\#H^2)$

$\#H = \#V/10$ ;  $\#V = 10^4$  donc centralité simple 1200 fois plus rapide à calculer en pratique.

# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

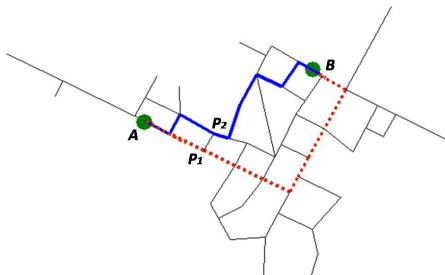


# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

- Passer par le chemin le plus simple

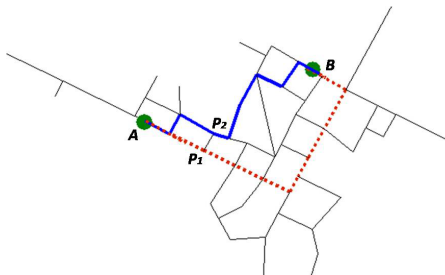


# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

- Passer par le chemin le plus simple
- Calculer l'hypergraphe



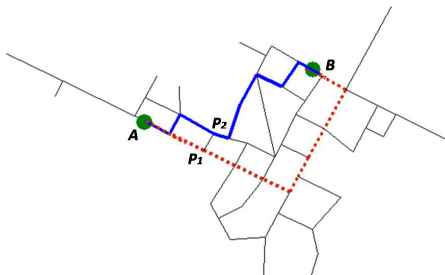


# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

- Passer par le chemin le plus simple
  - Calculer l'hypergraphe
  - Trouver la rue  $h_A$  et la rue  $h_B$

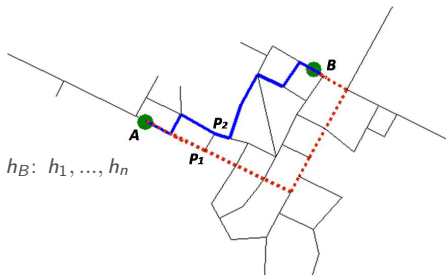


# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

- Passer par le chemin le plus simple
  - Calculer l'hypergraphe
  - Trouver la rue  $h_A$  et la rue  $h_B$
  - Trouver le plus court chemin entre  $h_A$  et  $h_B$ :  $h_1, \dots, h_n$



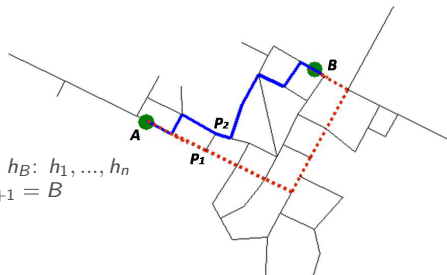
# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

■ Passer par le chemin le plus simple

- Calculer l'hypergraphe
- Trouver la rue  $h_A$  et la rue  $h_B$
- Trouver le plus court chemin entre  $h_A$  et  $h_B$ :  $h_1, \dots, h_n$
- Trouver leurs intersections  $A = c_1, \dots, c_{n+1} = B$



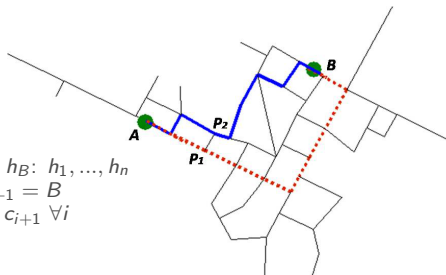
# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

■ Passer par le chemin le plus simple

- Calculer l'hypergraphe
- Trouver la rue  $h_A$  et la rue  $h_B$
- Trouver le plus court chemin entre  $h_A$  et  $h_B$ :  $h_1, \dots, h_n$
- Trouver leurs intersections  $A = c_1, \dots, c_{n+1} = B$
- Reconstituer sur  $h_i$  le chemin entre  $c_i$  et  $c_{i+1} \forall i$



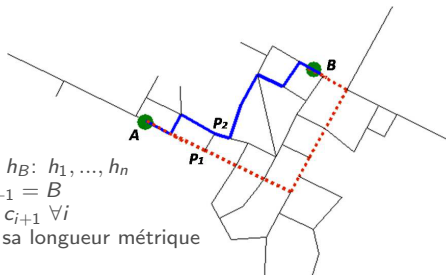
# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

■ Passer par le chemin le plus simple

- Calculer l'hypergraphe
- Trouver la rue  $h_A$  et la rue  $h_B$
- Trouver le plus court chemin entre  $h_A$  et  $h_B$ :  $h_1, \dots, h_n$
- Trouver leurs intersections  $A = c_1, \dots, c_{n+1} = B$
- Reconstituer sur  $h_i$  le chemin entre  $c_i$  et  $c_{i+1} \forall i$
- On en déduit le chemin le plus simple et sa longueur métrique



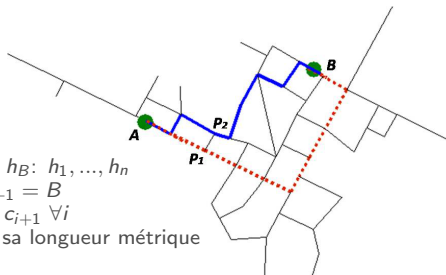
# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

■ Passer par le chemin le plus simple

- Calculer l'hypergraphe
- Trouver la rue  $h_A$  et la rue  $h_B$
- Trouver le plus court chemin entre  $h_A$  et  $h_B$ :  $h_1, \dots, h_n$
- Trouver leurs intersections  $A = c_1, \dots, c_{n+1} = B$
- Reconstituer sur  $h_i$  le chemin entre  $c_i$  et  $c_{i+1} \forall i$
- On en déduit le chemin le plus simple et sa longueur métrique



■ Complexité

- Calcul de l'hypergraphe en  $O(\#V)$
- Reconstitution des chemins en  $O(\log \#H)$

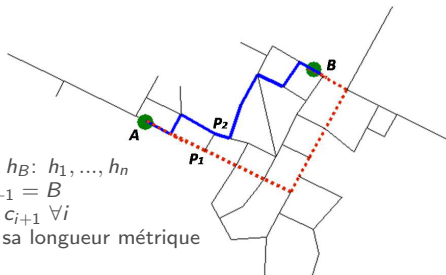
# L'algorithme du chauffeur de taxi

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Trouver le plus court chemin entre  $A$  et  $B$

- Passer par le chemin le plus simple

- Calculer l'hypergraphe
- Trouver la rue  $h_A$  et la rue  $h_B$
- Trouver le plus court chemin entre  $h_A$  et  $h_B$ :  $h_1, \dots, h_n$
- Trouver leurs intersections  $A = c_1, \dots, c_{n+1} = B$
- Reconstituer sur  $h_i$  le chemin entre  $c_i$  et  $c_{i+1} \forall i$
- On en déduit le chemin le plus simple et sa longueur métrique



- Complexité

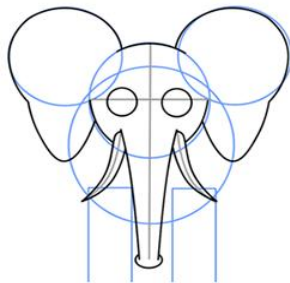
- Calcul de l'hypergraphe en  $O(\#V)$
- Reconstitution des chemins en  $O(\log \#H)$
- On peut aussi trouver les  $m$  plus simples et choisir le plus court en  $O(\#H)$

# 5 Modèles



# Objectifs - Qu'est-ce qu'un modèle ?

Corpus minimal d'hypothèses permettant de reproduire mathématiquement un ensemble de phénomènes observés.



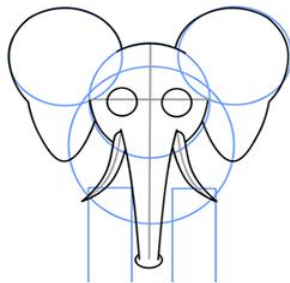
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

# Objectifs - Qu'est-ce qu'un modèle ?

Corpus minimal d'hypothèses permettant de reproduire mathématiquement un ensemble de phénomènes observés.

## Phénomènes à reproduire

- Effet petit monde dans le réseau de rues
- Distribution bi log-normale des longueurs de rues
- Distribution des aires en loi de puissance
- Diversité des réalisations



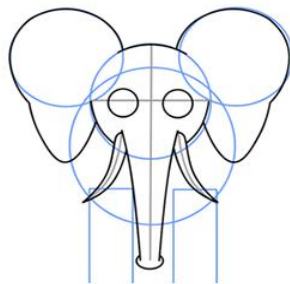
# Objectifs - Qu'est-ce qu'un modèle ?

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Corpus minimal d'hypothèses permettant de reproduire mathématiquement un ensemble de phénomènes observés.

## Phénomènes à reproduire

- Effet petit monde dans le réseau de rues
- Distribution bi log-normale des longueurs de rues
- Distribution des aires en loi de puissance
- Diversité des réalisations

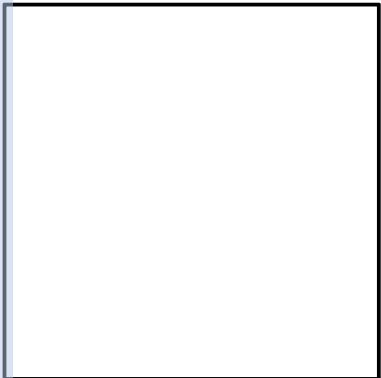


## Contraintes

- Perpendicularité aux éléments structurants
- Alignement des axes
- Division des unités foncières

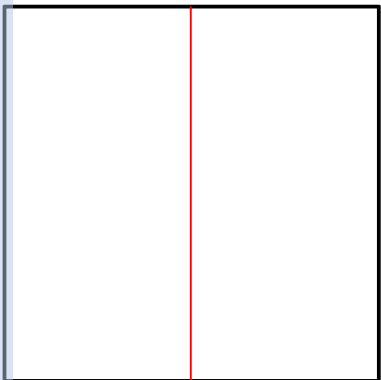
# Modèle de division

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



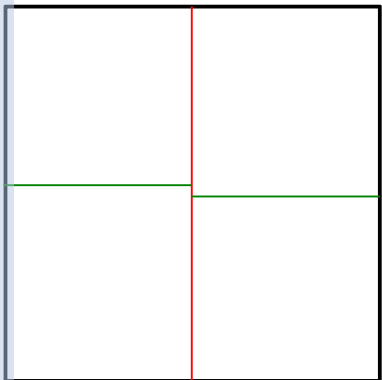
# Modèle de division

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



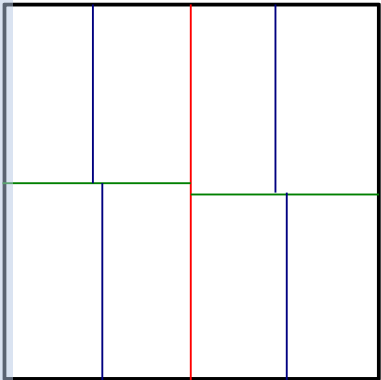
# Modèle de division

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



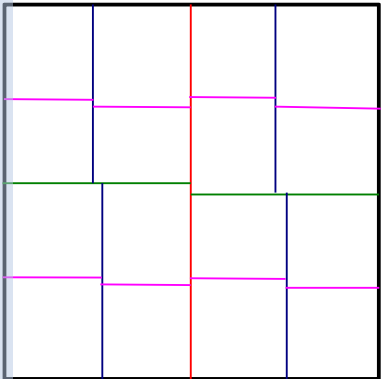
# Modèle de division

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Modèle de division

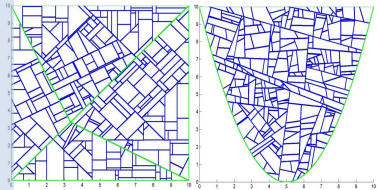
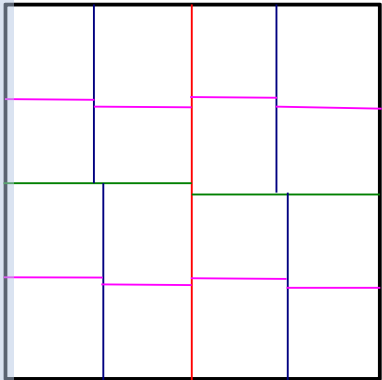
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012





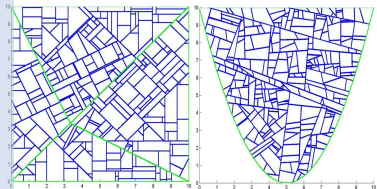
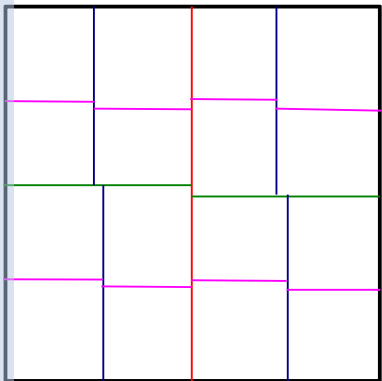
# Modèle de division

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



## Modèle de division

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

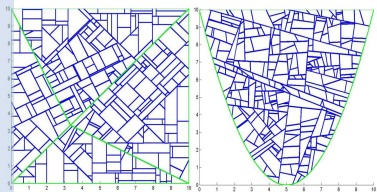
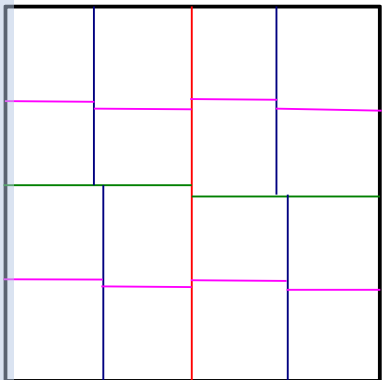


Petit monde

$$r_n \sim \underbrace{\frac{2}{3} \log_2 L_n}_{\simeq 0.92 \log}$$

## Modèle de division

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



Petit monde

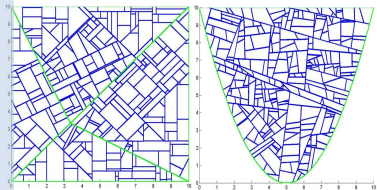
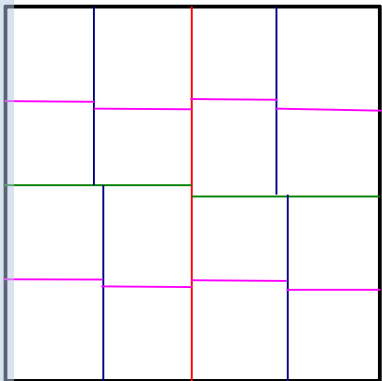
$$r_n \sim \underbrace{\frac{2}{3} \log_2 L_n}_{\simeq 0.92 \log}$$

Aire des blocs

Piquée autour de  $\frac{L^2}{2^n}$

# Modèle de division

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



Petit monde

$$r_n \sim \underbrace{\frac{2}{3} \log_2 L_n}_{\simeq 0.92 \log}$$

Aire des blocs

Piquée autour de  $\frac{L^2}{2^n}$

Longueur des rues

Loi exponentielle

# Modèle de Division / Extension

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



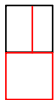
# Modèle de Division / Extension

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Modèle de Division / Extension

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Modèle de Division / Extension

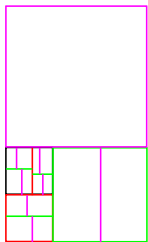
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012





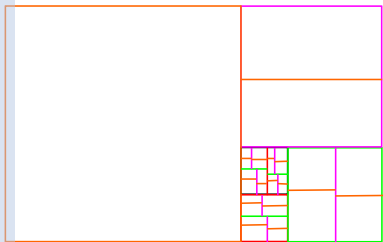
# Modèle de Division / Extension

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



## Modèle de Division / Extension

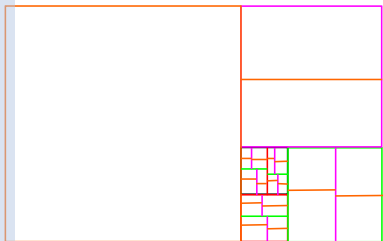
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



Aire des blocs d'extension  $\sim \phi^n$

## Modèle de Division / Extension

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



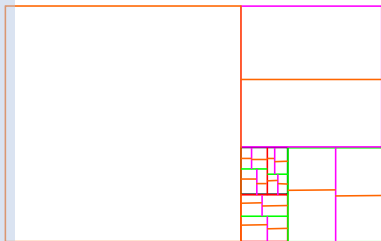
Aire des blocs d'extension  $\sim \phi^n$

Petit monde

Conservé (sur-structure)

## Modèle de Division / Extension

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Aire des blocs d'extension  $\sim \phi^n$ 

Petit monde

Conservé (sur-structure)

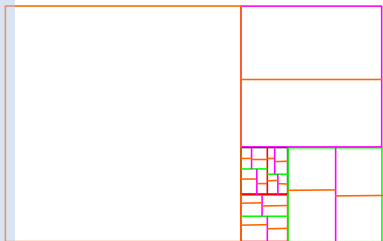
Aire des blocs

$$\theta = \log_2(\phi^2)$$

$$A_m^{(n)} \simeq \underbrace{\left(2^n \cdot L^2 / 2^{(1-\theta)}\right)}_{c^{(n)}(\phi)} \left(f_m^{(n)}\right)^{(1-\theta)}$$

## Modèle de Division / Extension

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Aire des blocs d'extension  $\sim \phi^n$ 

Petit monde

Conservé (sur-structure)

Aire des blocs

$$\theta = \log_2(\phi^2)$$

$$A_m^{(n)} \simeq \underbrace{\left(2^n \cdot L^2 / 2^{(1-\theta)n}\right)}_{c^{(n)}(\phi)} \left(f_m^{(n)}\right)^{(1-\theta)}$$

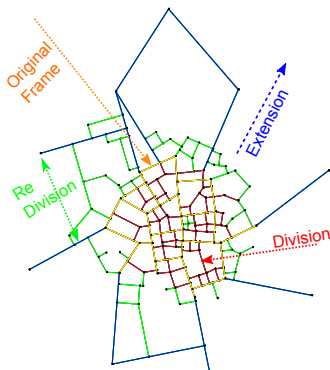
Longueur des rues

Echelle logarithmique, deux modes.

## Morphogénèse - Principes

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

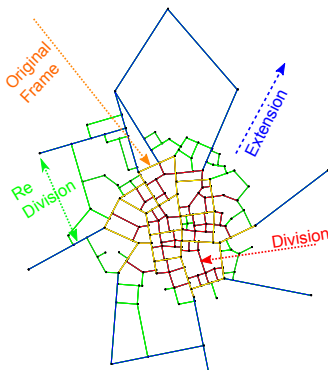
Implémenter de manière plus réaliste et flexible un processus de division-extension avec des règles d'optimalité locale.



## Morphogénèse - Principes

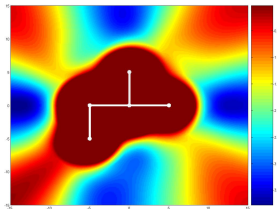
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

Implémenter de manière plus réaliste et flexible un processus de division-extension avec des règles d'optimalité locale.



- Découpler positionnement et géométrie

- Le réseau crée un champ de potentiel
- Un nouveau "bailleur" se place de façon optimale
- Puis il se raccorde au mieux au réseau existant



# Morphogénèse - Démonstration

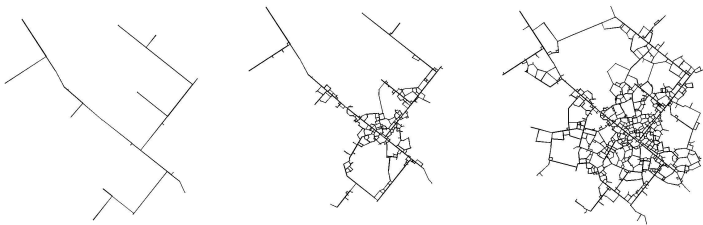
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

`./media/morphogenese.avi`



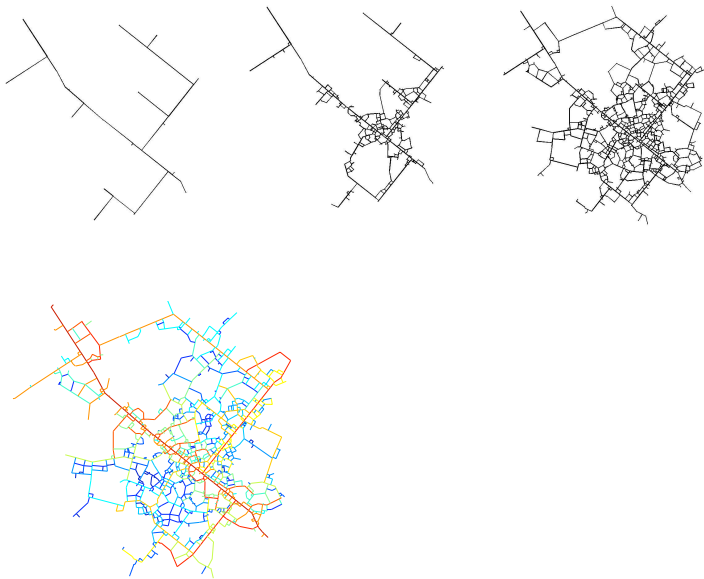
# Morphogénèse

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



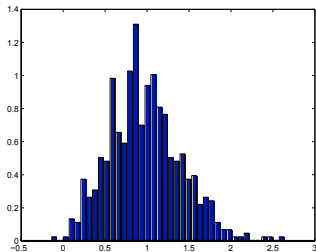
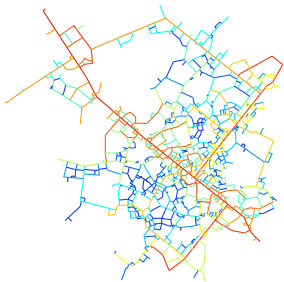
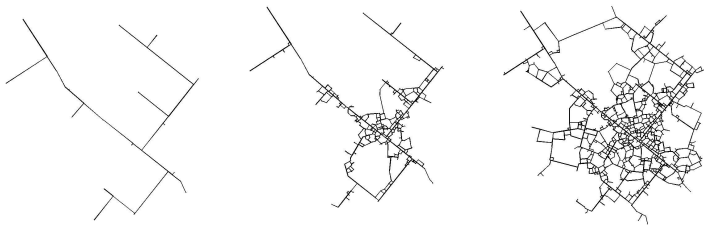
# Morphogénèse

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



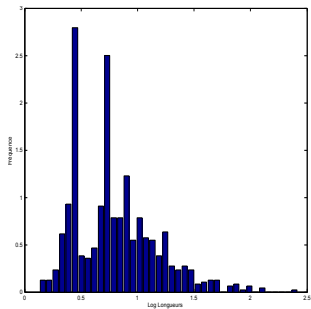
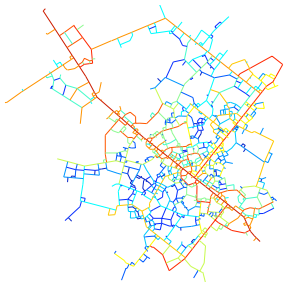
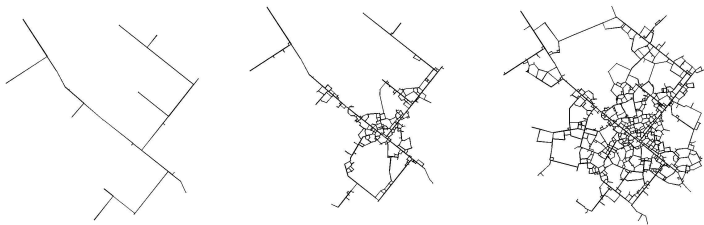
# Morphogénèse

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012



# Morphogénèse

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

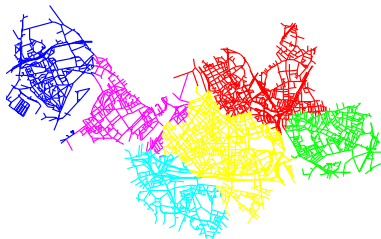


# 6 Conclusion

# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

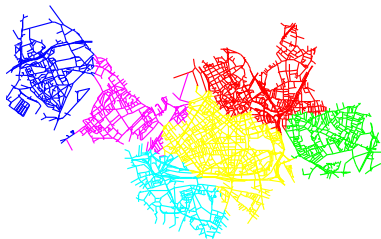
## ■ Contributions de l'exposé



# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- **Contributions de l'exposé**
  - Représentation géométrique de la ville

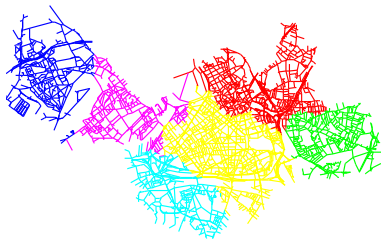


# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

## ■ Contributions de l'exposé

- Représentation géométrique de la ville
- Observation de phénomènes dans l'hypergraphe



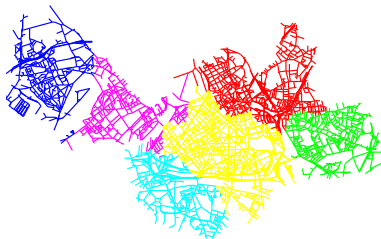


# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

## ■ Contributions de l'exposé

- Représentation géométrique de la ville
- Observation de phénomènes dans l'hypergraphe
- Corpus d'algorithmes optimisés

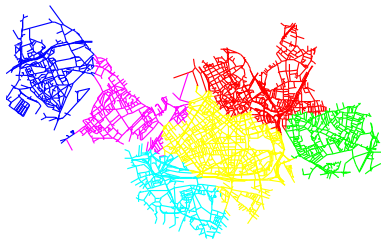


# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

## ■ Contributions de l'exposé

- Représentation géométrique de la ville
- Observation de phénomènes dans l'hypergraphe
- Corpus d'algorithmes optimisés
- Modèles géométriques de développements de la ville



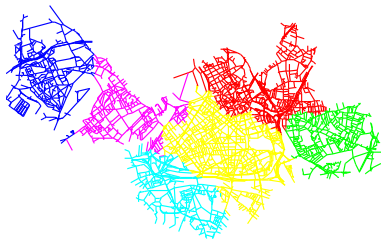
# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

## ■ Contributions de l'exposé

- Représentation géométrique de la ville
- Observation de phénomènes dans l'hypergraphe
- Corpus d'algorithmes optimisés
- Modèles géométriques de développements de la ville

## ■ Autres contributions



# Conclusion

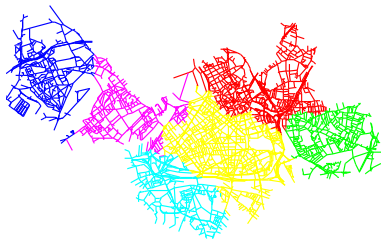
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

## ■ Contributions de l'exposé

- Représentation géométrique de la ville
- Observation de phénomènes dans l'hypergraphe
- Corpus d'algorithmes optimisés
- Modèles géométriques de développements de la ville

## ■ Autres contributions

- Une équation différentielle intégrale pour l'évolution du profil de densité



# Conclusion

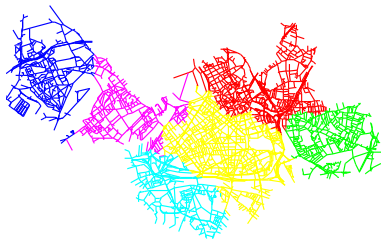
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

## ■ Contributions de l'exposé

- Représentation géométrique de la ville
- Observation de phénomènes dans l'hypergraphe
- Corpus d'algorithmes optimisés
- Modèles géométriques de développements de la ville

## ■ Autres contributions

- Une équation différentielle intégrale pour l'évolution du profil de densité
- Modélisation en géométrie statistique



# Conclusion

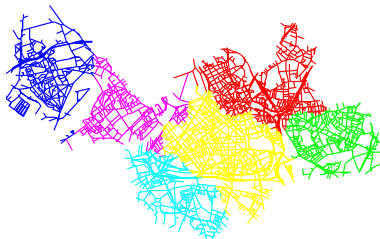
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

## ■ Contributions de l'exposé

- Représentation géométrique de la ville
- Observation de phénomènes dans l'hypergraphe
- Corpus d'algorithmes optimisés
- Modèles géométriques de développements de la ville

## ■ Autres contributions

- Une équation différentielle intégrale pour l'évolution du profil de densité
- Modélisation en géométrie statistique
- Segmentation de cartes en zones homogènes



# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques

# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance



# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance
  - Croissance planifiée

# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance
  - Croissance planifiée
  - Croissance organique

# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance
  - Croissance planifiée
  - Croissance organique
  - Variabilité continue de formes

# Conclusion

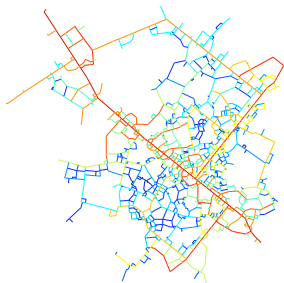
tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance
  - Croissance planifiée
  - Croissance organique
  - Variabilité continue de formes
- Rôle de la rue et des éléments structurants dans le développement de la ville

# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

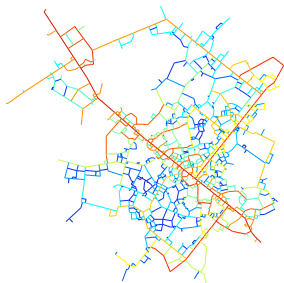
- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance
  - Croissance planifiée
  - Croissance organique
  - Variabilité continue de formes
- Rôle de la rue et des éléments structurants dans le développement de la ville
- Des ressources hiérarchiquement distribuées, un système multi-échelles



# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance
  - Croissance planifiée
  - Croissance organique
  - Variabilité continue de formes
- Rôle de la rue et des éléments structurants dans le développement de la ville
- Des ressources hiérarchiquement distribuées, un système multi-échelles
  - Au niveau des tailles des villes



# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance
  - Croissance planifiée
  - Croissance organique
  - Variabilité continue de formes
- Rôle de la rue et des éléments structurants dans le développement de la ville
- Des ressources hiérarchiquement distribuées, un système multi-échelles
  - Au niveau des tailles des villes
  - Au niveau des quartiers



# Conclusion

tel-00714310, version 1 - 3 Jul 2012

- Une diversité de formes mais des constantes géométriques
- Différents modes de croissance
  - Croissance planifiée
  - Croissance organique
  - Variabilité continue de formes
- Rôle de la rue et des éléments structurants dans le développement de la ville
- Des ressources hiérarchiquement distribuées, un système multi-échelles
  - Au niveau des tailles des villes
  - Au niveau des quartiers
  - Au niveau des rues

