

De la caractérisation des réseaux complexes à l'épidémiologie

Alain Barrat

Centre de Physique Théorique, Marseille



<http://www.cpt.univ-mrs.fr/~barrat>
<http://sites.google.com/site/cxnets>
<http://www.sociopatterns.org>

Etude des réseaux complexes

- Etudes empiriques et phénoménologiques:
dégager des caractéristiques générales
- Modélisation:
comprendre les mécanismes
- Conséquences:
comprendre l'importance des différentes caractéristiques pour différents phénomènes, par exemple la propagation d'épidémies, la fragilité en face de pannes ou d'attaques...
- Perspectives et nouveaux développements: réseaux dynamiques

Qu'est-ce qu'un réseau ?

Points/sites reliés par des liens



individus

ordinateurs

pages web

aéroports

molécules

....



relations sociales

(ex: collaborations scientifiques)

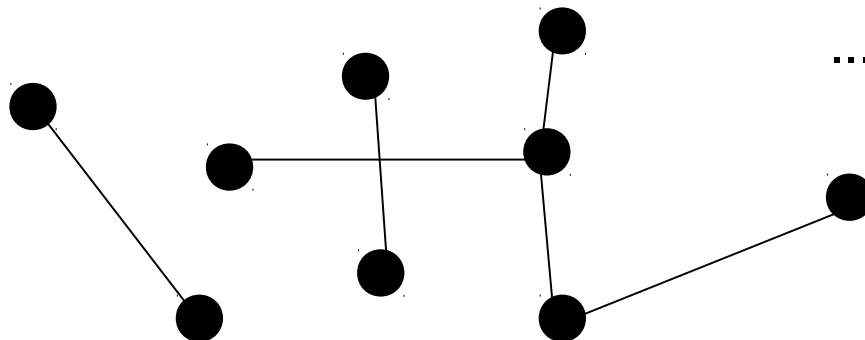
câbles

hyperliens

connexions aériennes

réactions chimiques

....



Réseau des collaborations scientifiques

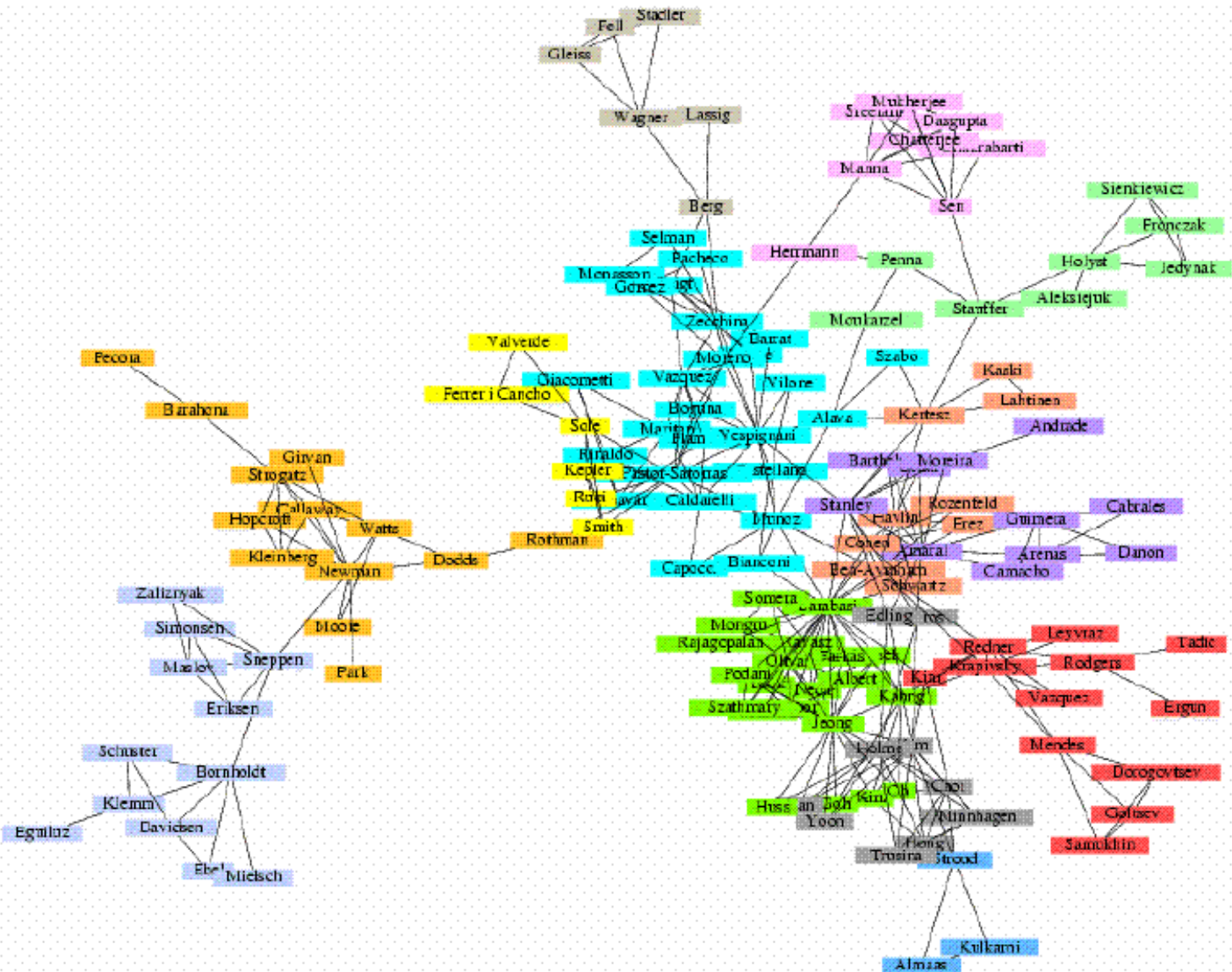
Sites: chercheurs

Liens: articles co-écrits

Poids sur les liens: dépendent du

- nombre d'articles co-écrits
- nombre d'auteurs
- nombre de citations...

Réseau des collaborations scientifiques



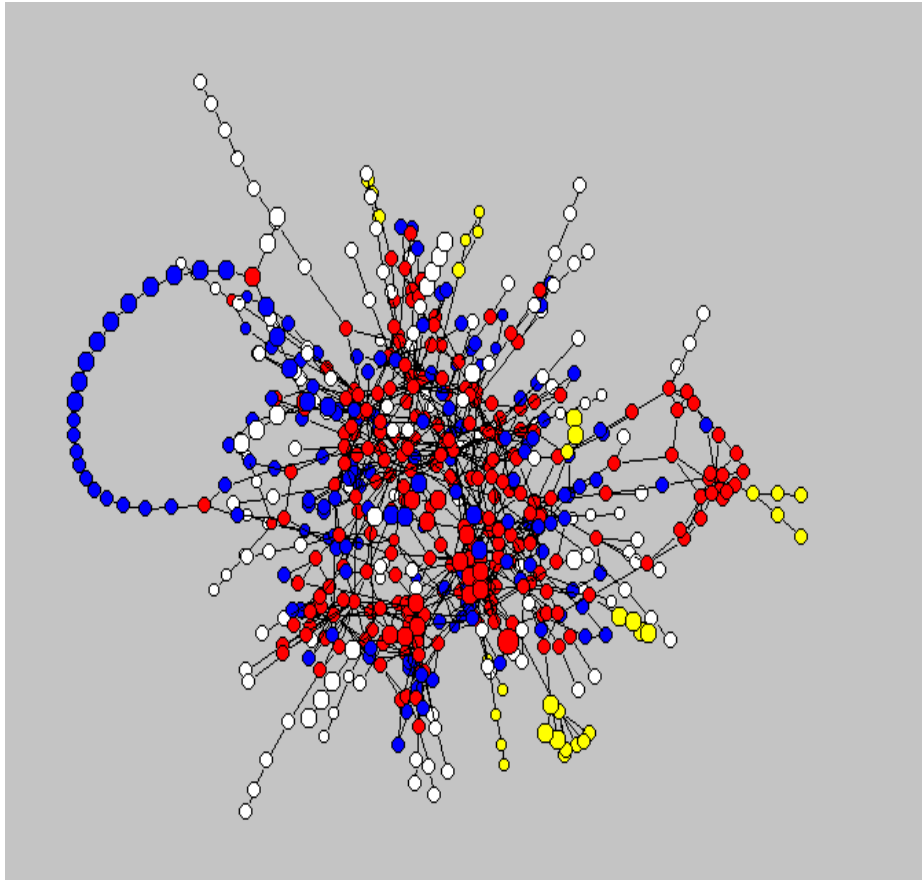
M. E. J. Newman and M. Girvan, *Physical Review E* **69**, 026113 (2004).

Image: MEJ Newman, <http://www-personal.umich.edu/~mejn/networks/>

Réseau métabolique

Sites: métabolites

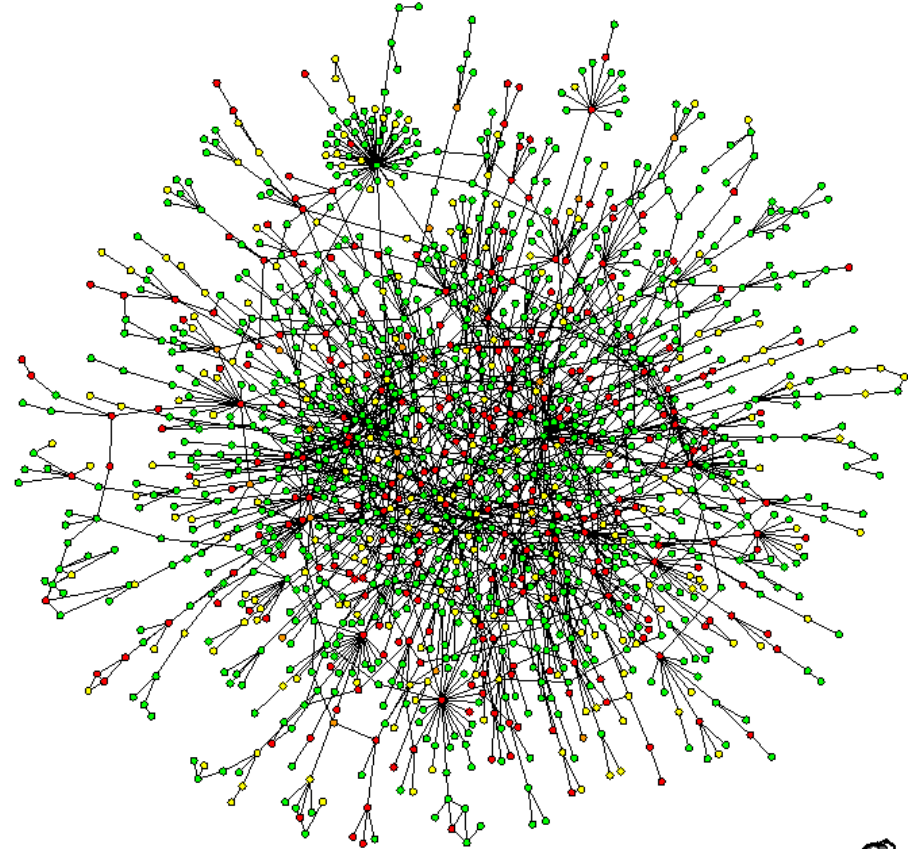
Liens: réactions chimiques



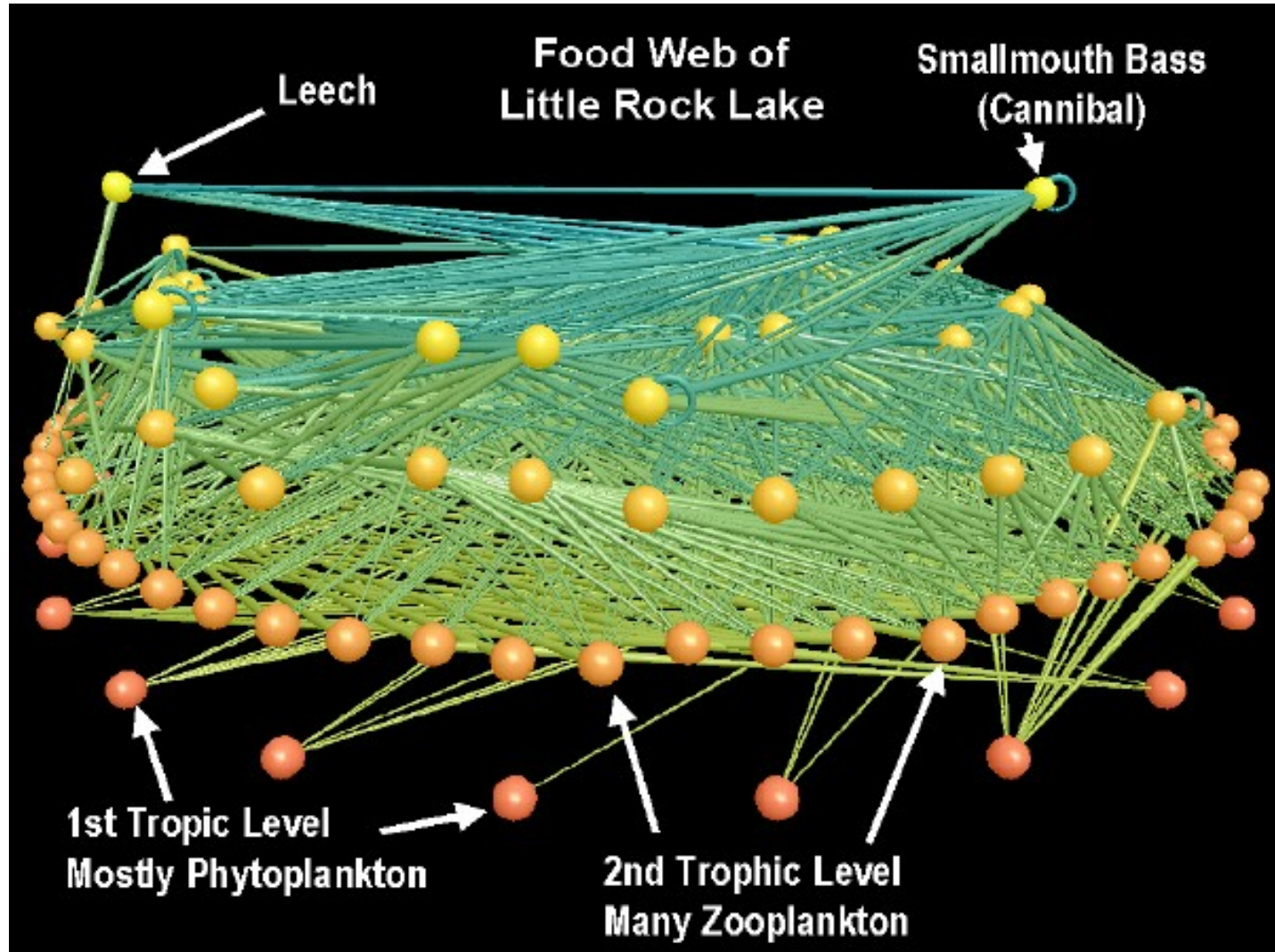
Réseau d'interactions de protéines

Sites: protéines

Liens: interactions

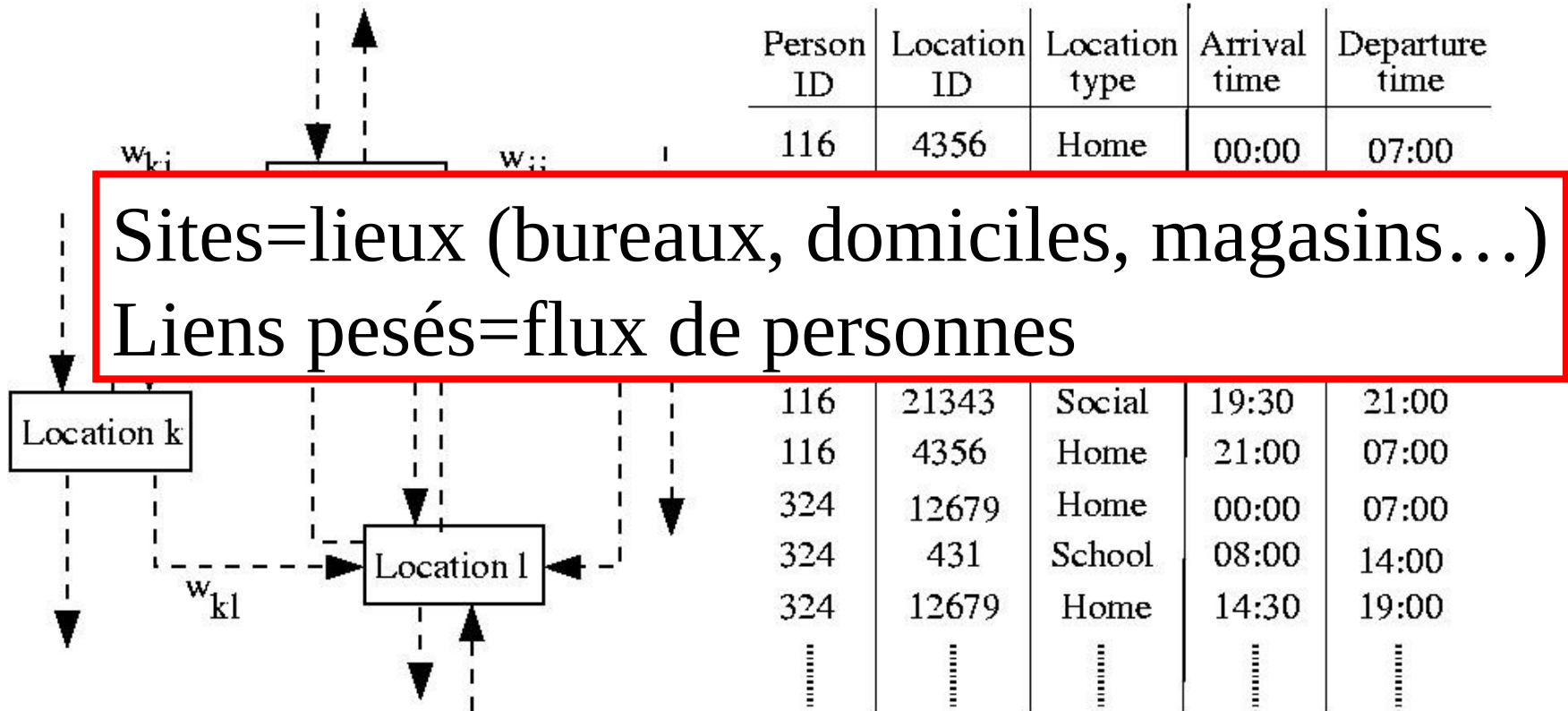


Food-webs

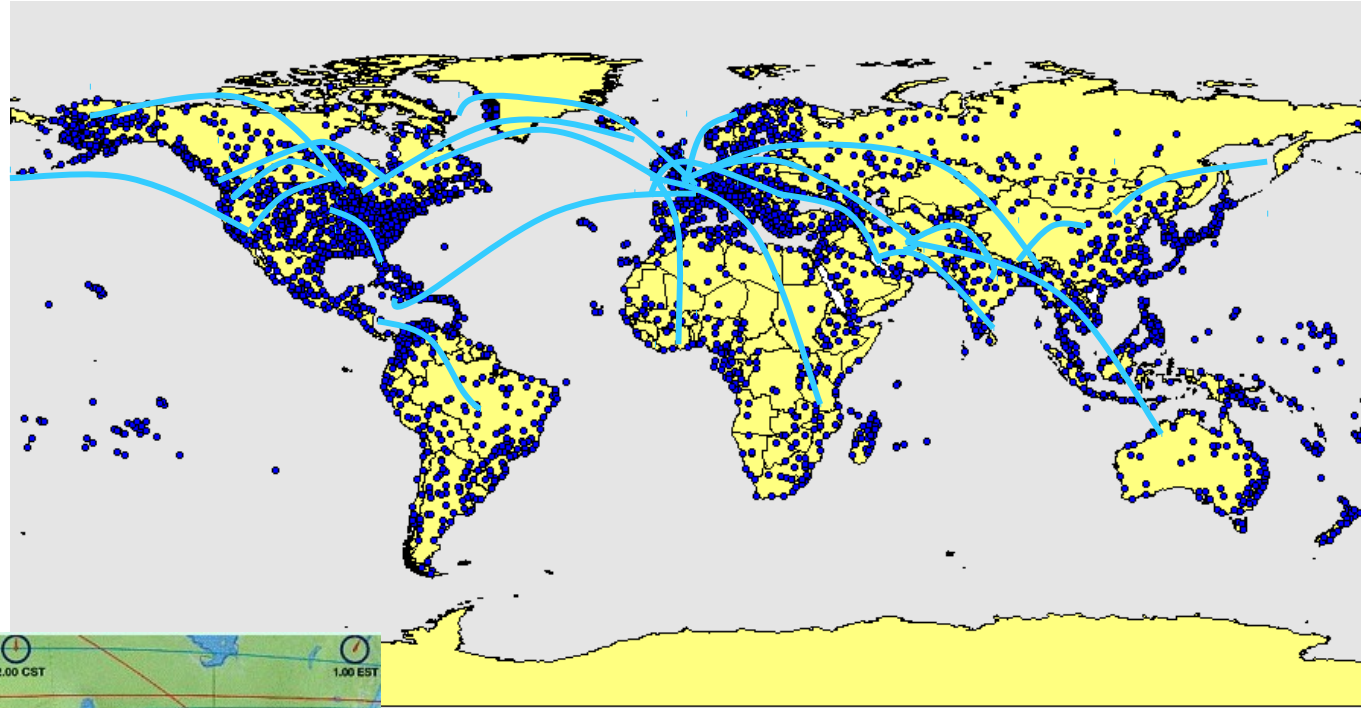


Réseau de transport

TRANSIMS



Réseaux de transport aérien



Internet

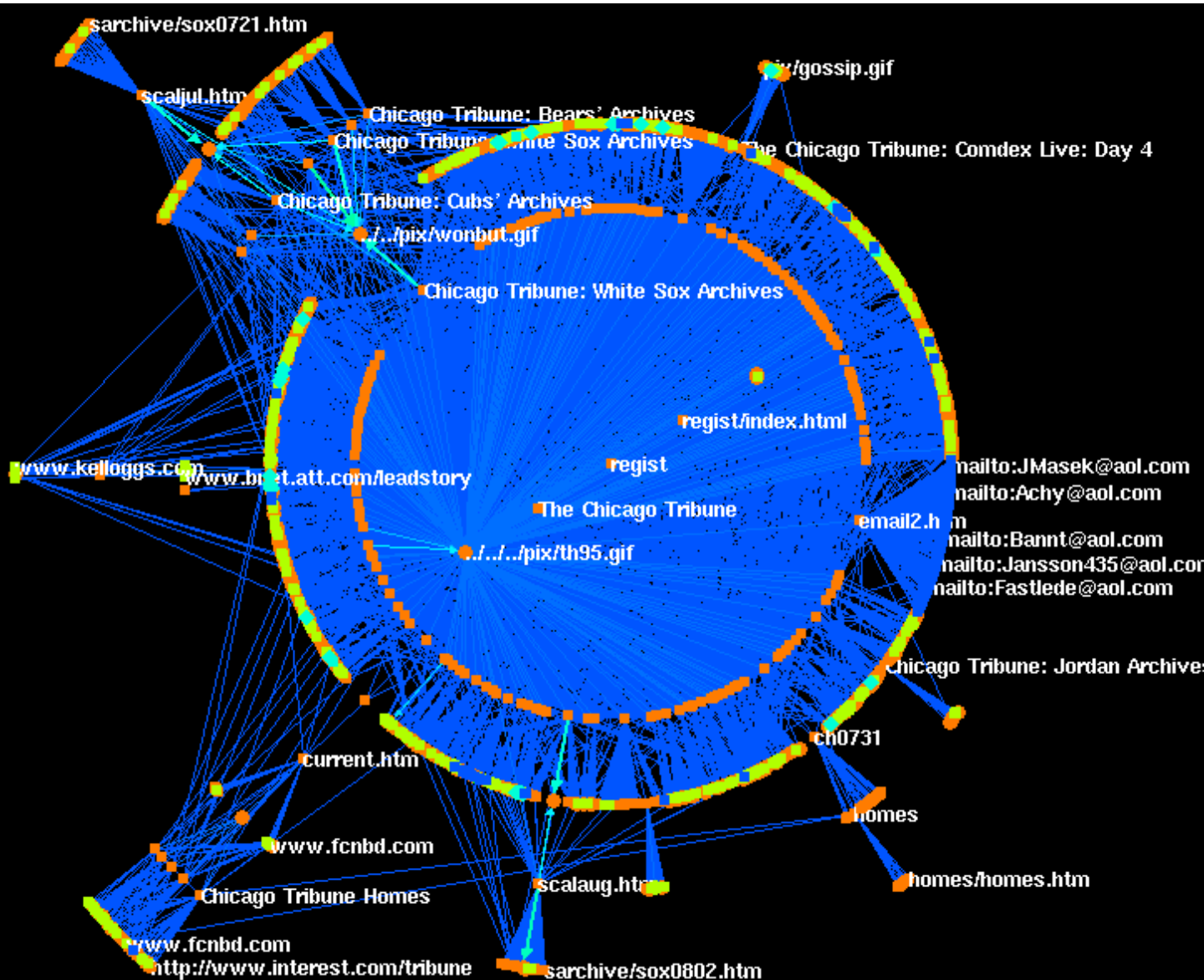
- **Computers (routers)**
- **Satellites**
- **Modems**
- **Phone cables**
- **Optic fibers**
- **EM waves**



World-Wide-Web

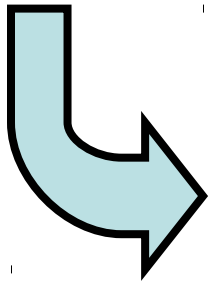
Réseau virtuel

- pages web
- hyperliens



Caractéristiques des réseaux

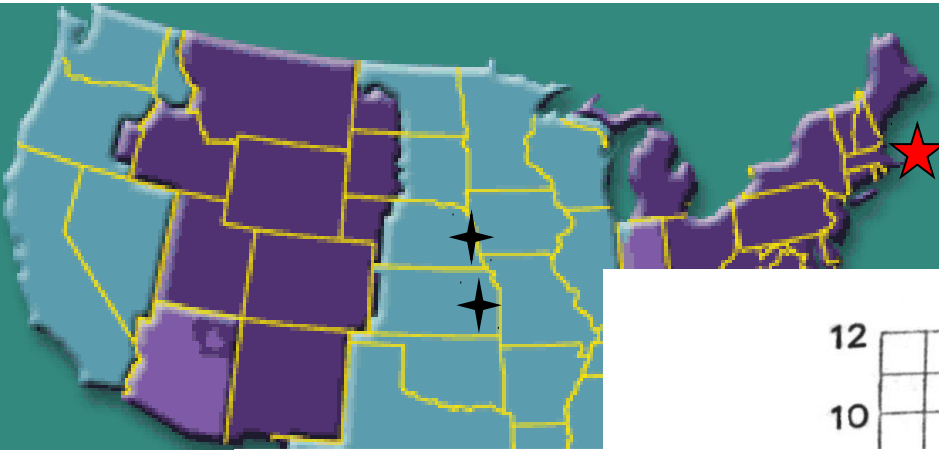
Réseaux: d'origines très différentes



Ont-ils quelque chose en commun?
Propriétés communes?

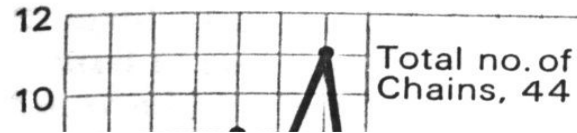
Le caractère abstrait de la représentation en termes de graphes et de la théorie des graphes permet de répondre....

Réseaux sociaux: l'expérience de Milgram

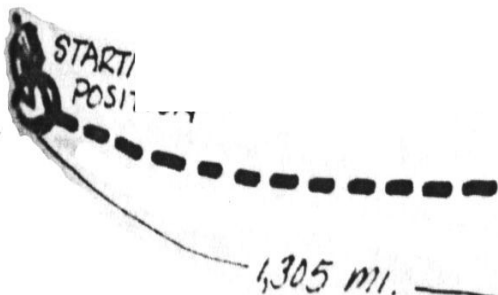


Milgram, *Psych Today* **2**, 60 (1967)

Dodds et al., *Science* **301**, 827 (2002)



“Six degrés de séparation”: “petit-monde”

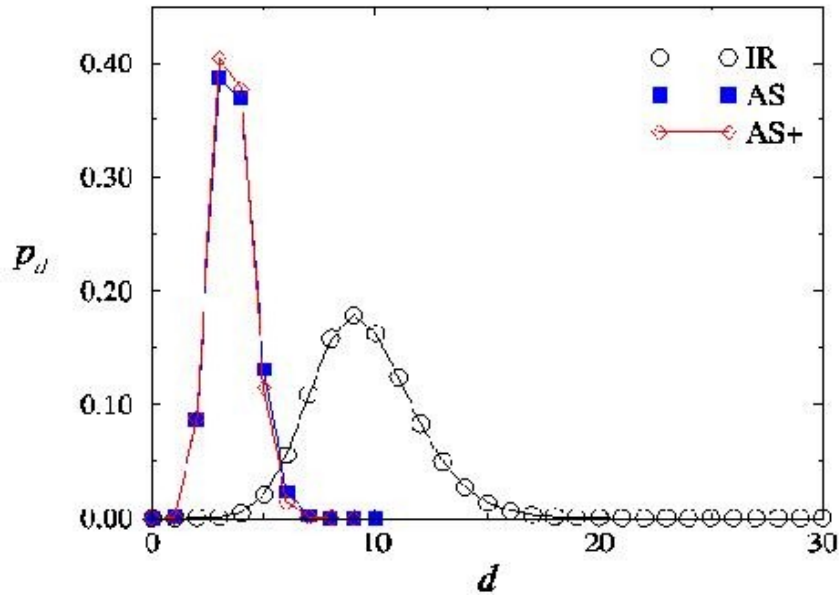


to reach Target Person

In the Nebraska Study the chains varied from two to 10 intermediate acquaintances with the median at five.



L'Internet: un autre "petit-monde"

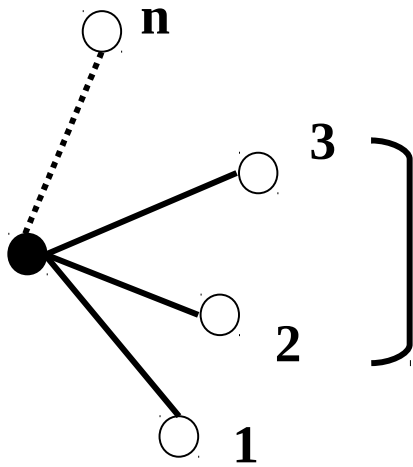


**Histogramme des distances
entre deux sites:**

**distances typiques très petites
par rapport à la taille d'Internet**

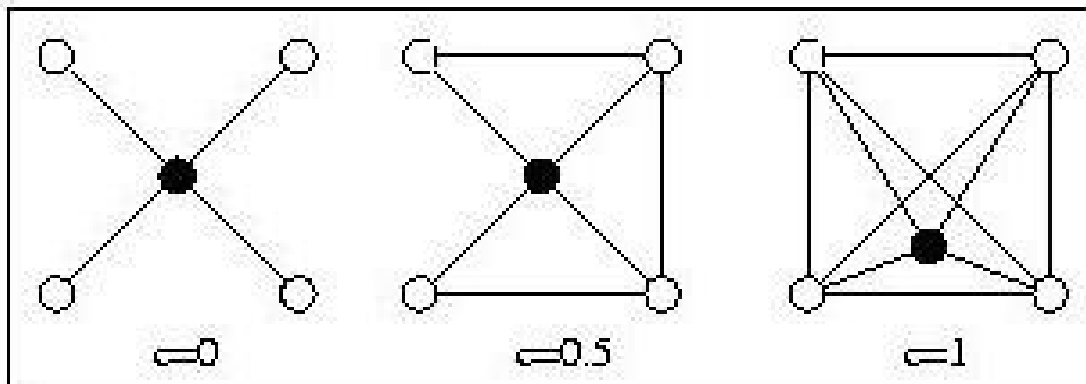
Autres exemples: WWW, réseaux de transports, etc...

Une autre caractéristique répandue: "Clustering"



Plus grande probabilité d'être connectés

Clustering: Mes amis se connaissent très probablement entre eux
(exemple typique: réseaux sociaux)



Effet quantifié par
le coefficient de clustering,
entre 0 et 1

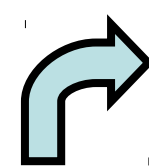
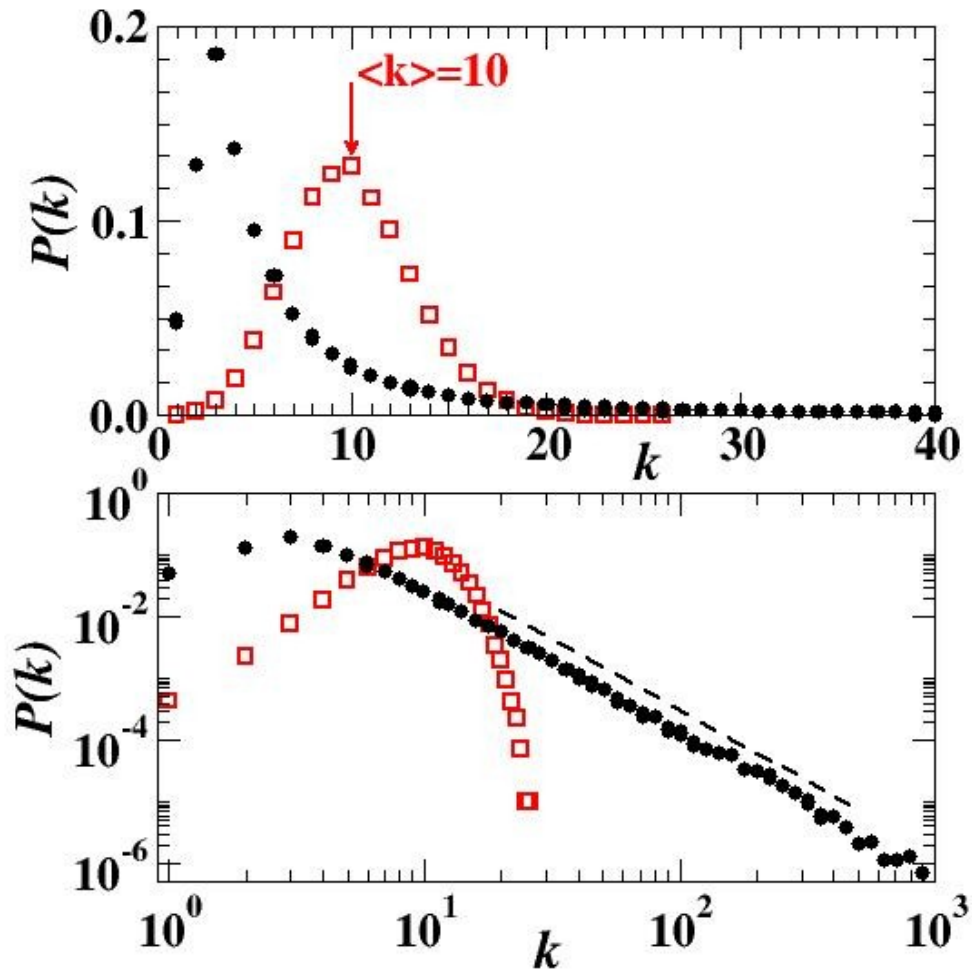
Hétérogénéité

$P(k) = N_k / N =$ **probabilité** qu'un site choisi au hasard ait k voisins

Deux types de distributions

- **Réseaux homogènes**: $P(k)$ décroît rapidement
- **Réseaux hétérogènes**: $P(k)$ a une queue large

Hétérogénéité



Échelle lin

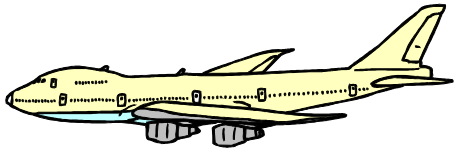
Poisson

vs.

Loi de puissance



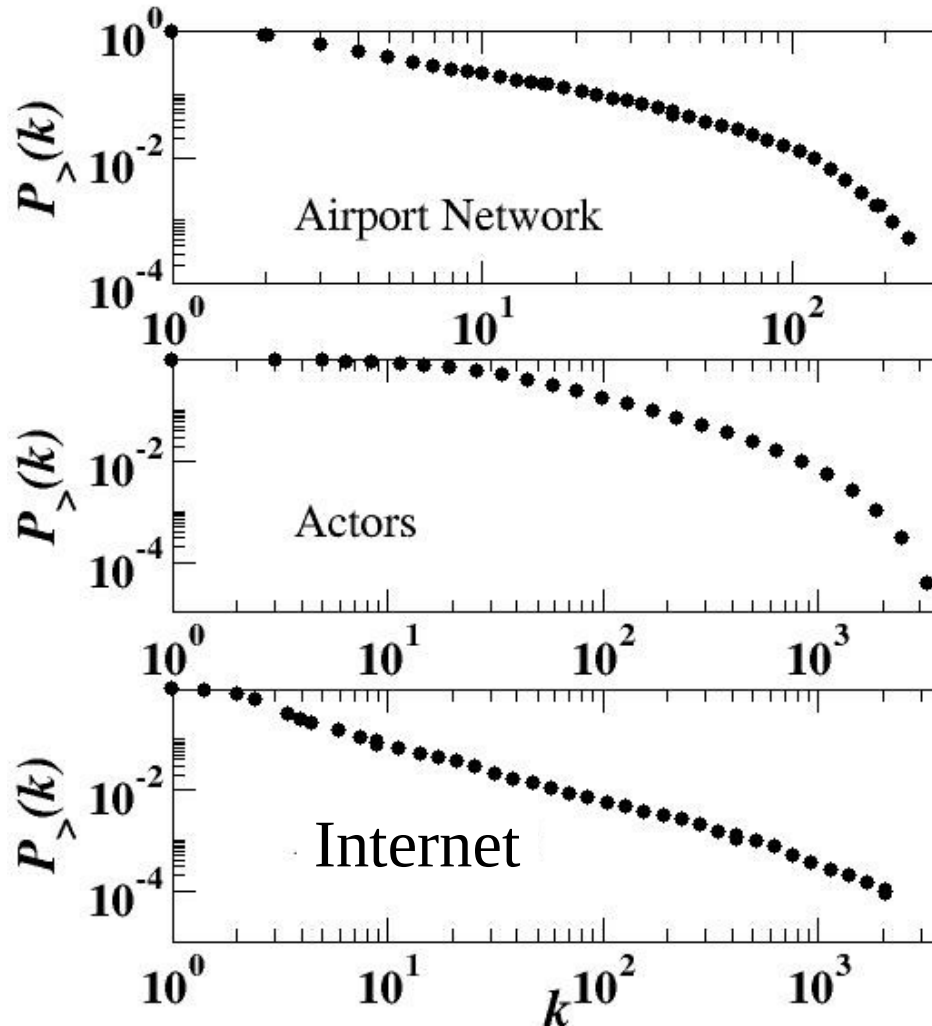
Échelle log



Réseau de transport aérien



Hétérogénéité empirique



Distributions
larges

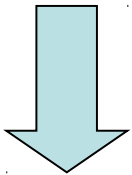
(souvent proches de lois
de puissance
 $P(k) \sim k^{-\gamma}$, $2 < \gamma < 3$)

Pas d'échelle
caractéristique

Principales caractéristiques des réseaux complexes

- **Nombreux éléments en interaction**
- **Evolution dynamique**
- **Auto-organisation**

**Internet,
World-Wide-Web,
Réseaux sociaux
etc...**



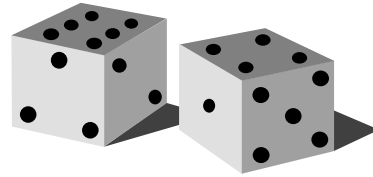
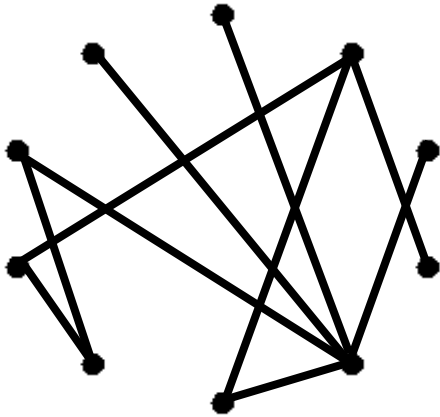
Architecture non-triviale
Propriétés émergentes
Phénomènes coopératifs



{ petit-monde
clustering
hétérogénéité

Modèle le plus “simple” de réseaux: Erdős-Renyi (1960)

N points, liés avec probabilité p :



Réseau

-statique

-distances courtes ($\log N$)

-sans cohésion locale

-**homogène**: nombre de voisins similaire pour tous

Modélisation des réseaux complexes

Processus microscopiques des composants



**Propriétés statistiques et dynamiques
au niveau macroscopique**

Physique

Statistique

Exemple de mécanisme: L'attachement préférentiel

1) Les réseaux croissent par l'addition de nouveaux sites

Exemples:

WWW : addition de nouvelles pages webs

Internet : nouveaux ordinateurs, serveurs

2) Les nouveaux sites se connectent plutôt vers des sites ayant déjà de nombreux voisins

Exemples:

WWW : liens vers des pages webs connues

Internet : liens vers des fournisseurs d'accès bien connectés

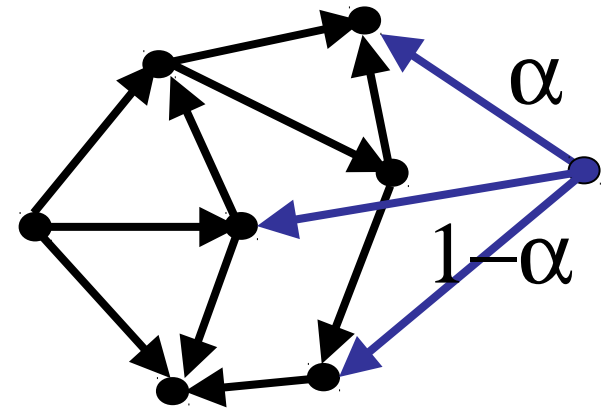
1) + 2) => réseau hétérogène ($P(k) \sim k^{-3}$)

Un autre exemple

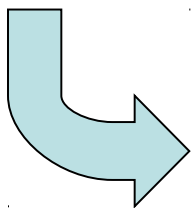
Copying model

Réseau en croissance:

- Introduction d'un nouveau site
- Choix d'un ancien site
- Le nouveau site copie m liens du site sélectionné



- Chaque nouveau lien est maintenu avec proba α , changé au hasard avec proba $1-\alpha$



Réseau hétérogène $(P(k) \sim (k+k_0)^{-\gamma})$

Conséquences des propriétés des réseaux sur les processus dynamiques

Exemple: épidémiologie

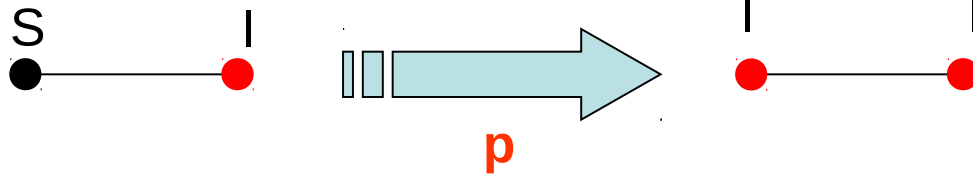
Modèles de propagation d'épidémies

Description schématique des individus et de leur état:

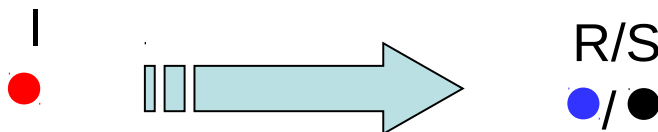
Les individus peuvent se trouver dans certains états:

Sain/Susceptible * **Infecté** * Immunisé/Remis

-Propagation par contact

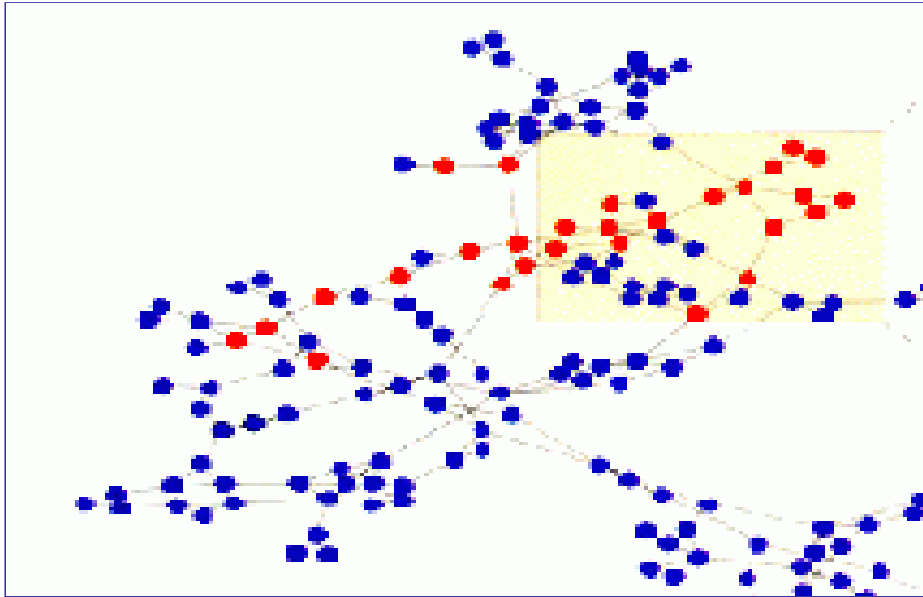


-Guérison/immunisation



Modèles
typiques de
physique
statistique

Modèles de propagation d'épidémies



Réseau de contacts:

- Individus=sites
- Liens=possibilité de propagation




Réseau

dont la topologie
joue un rôle important

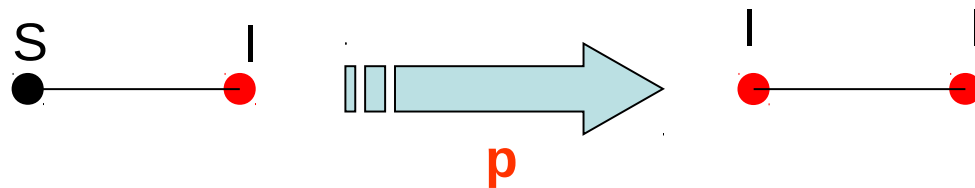
Importance de la topologie du réseau de contacts

Virus sur ordinateurs  Topologie d'Internet

“Virus” propagés par email  Topologie du réseau d'email

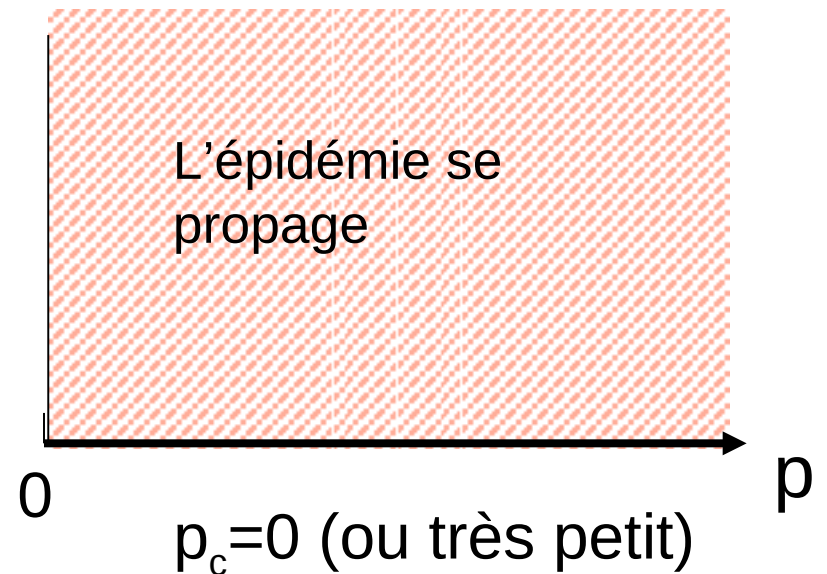
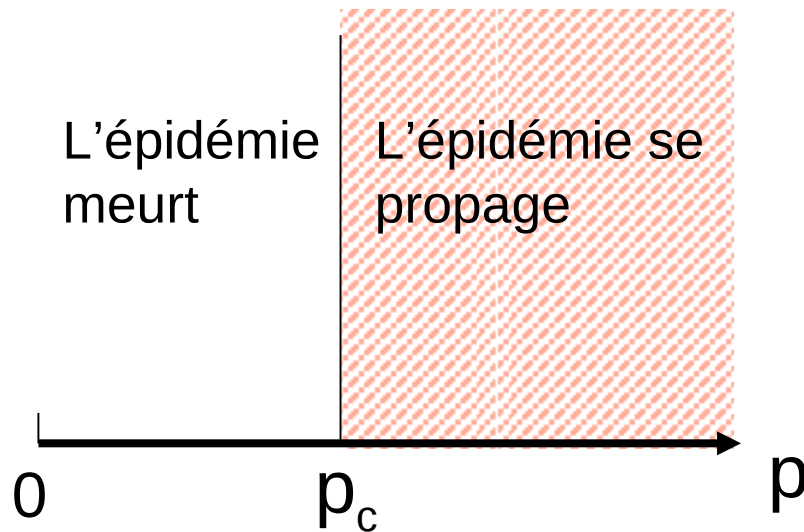
Epidémiologie  Topologie des réseaux sociaux,
des réseaux de transports

Importance de la topologie du réseau de contacts



Graphes homogènes

Graphes hétérogènes



Importance de la topologie du réseau de contacts

Stratégies de défense (vaccination)

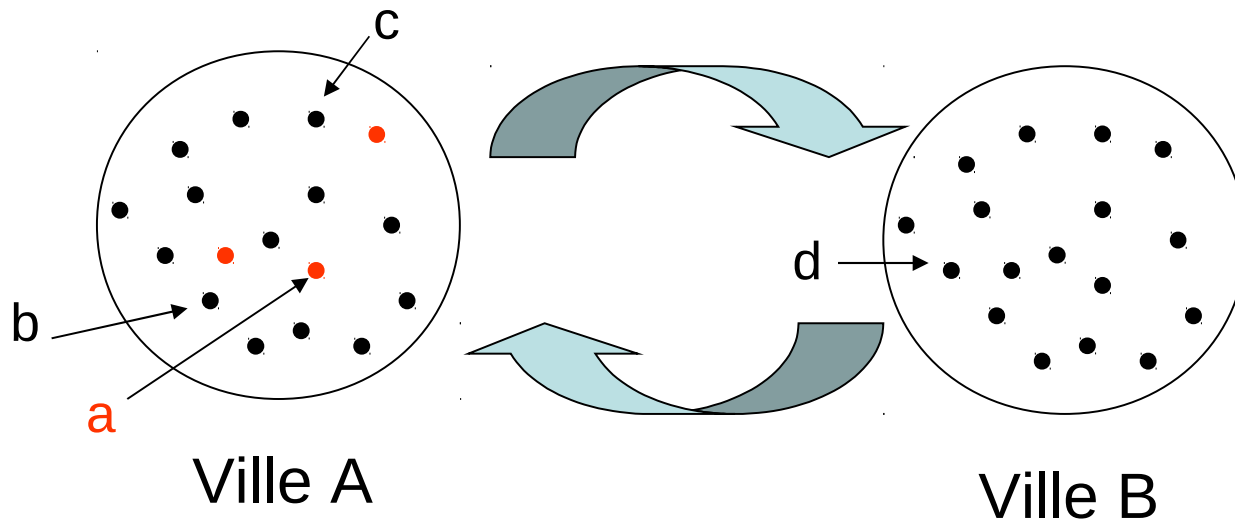
Graphes homogènes:

La vaccination aléatoire
est efficace

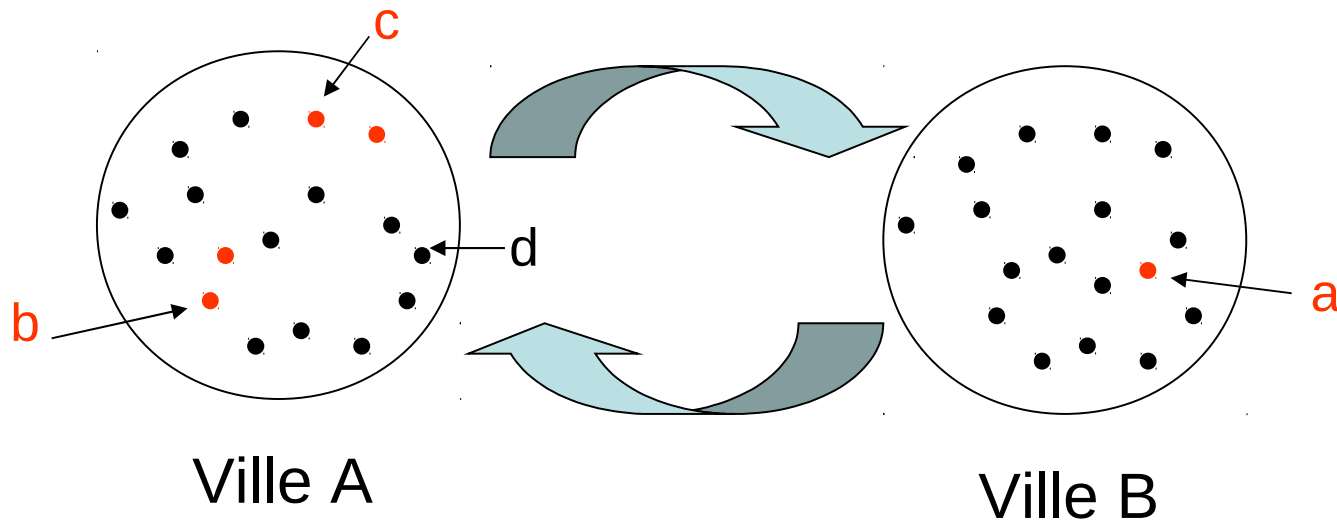
Graphes hétérogènes

Nécessité de nouvelles
stratégies de vaccination
(ciblées)

Un autre exemple de modèle de propagation d'une épidémie



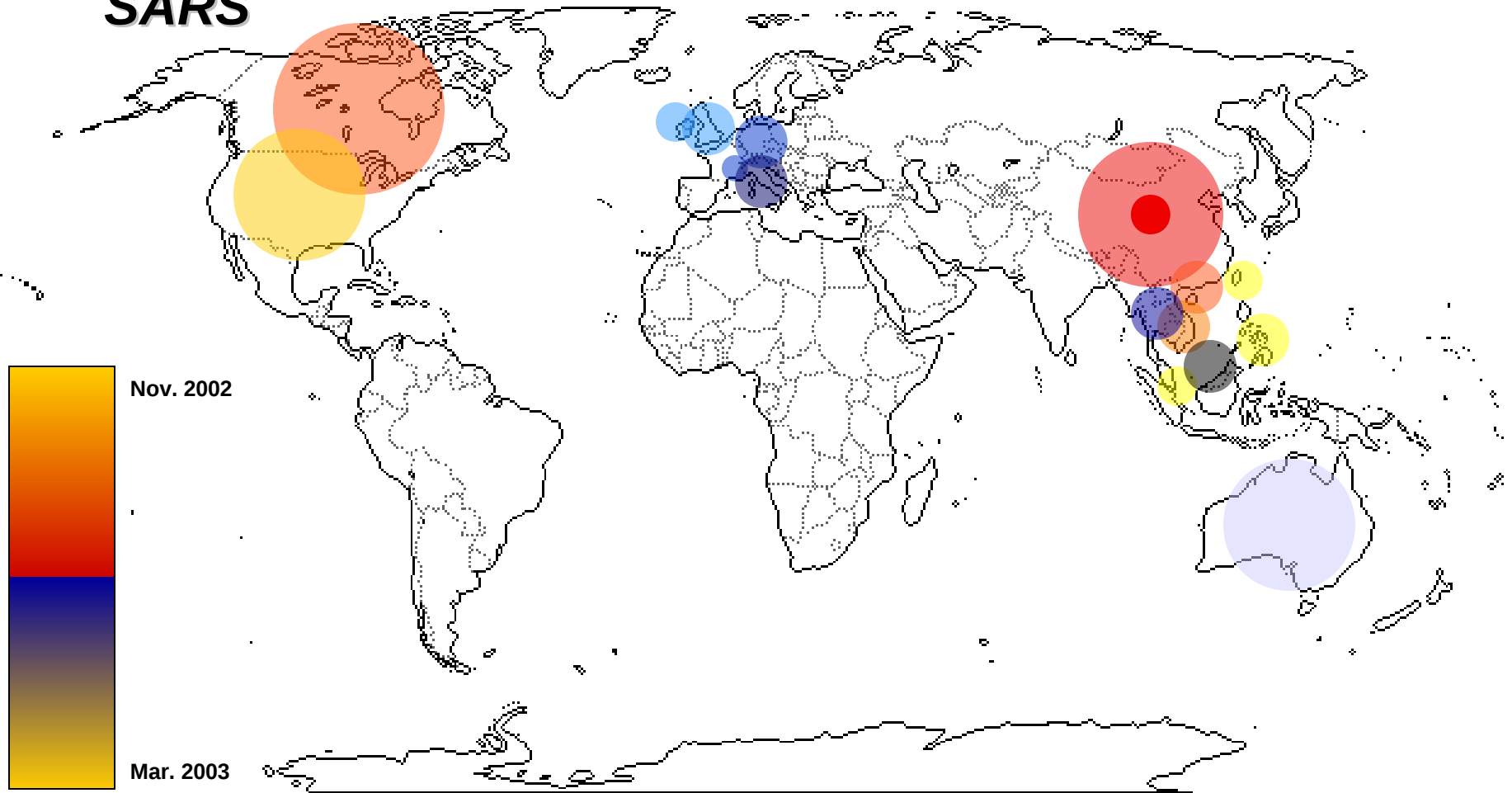
Un autre exemple; propagation d'une épidémie



=> Importance du réseau de transport !

Une épidémie récente

SARS

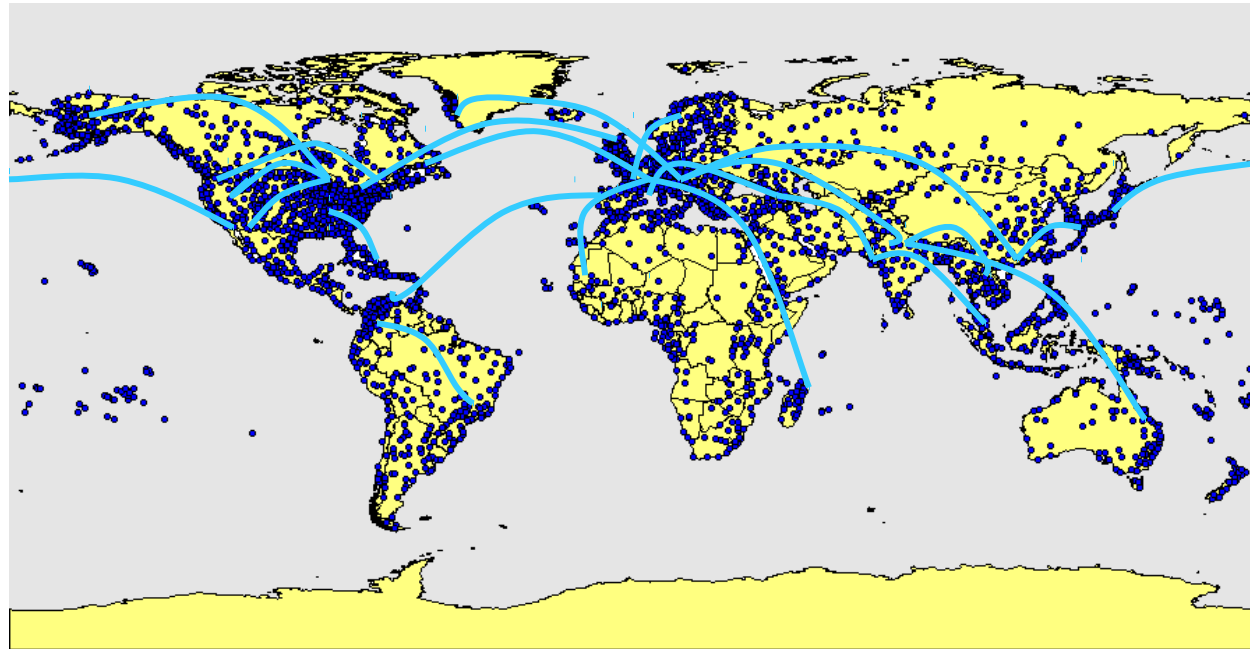


Modèles de propagation globale

description à plusieurs niveaux :

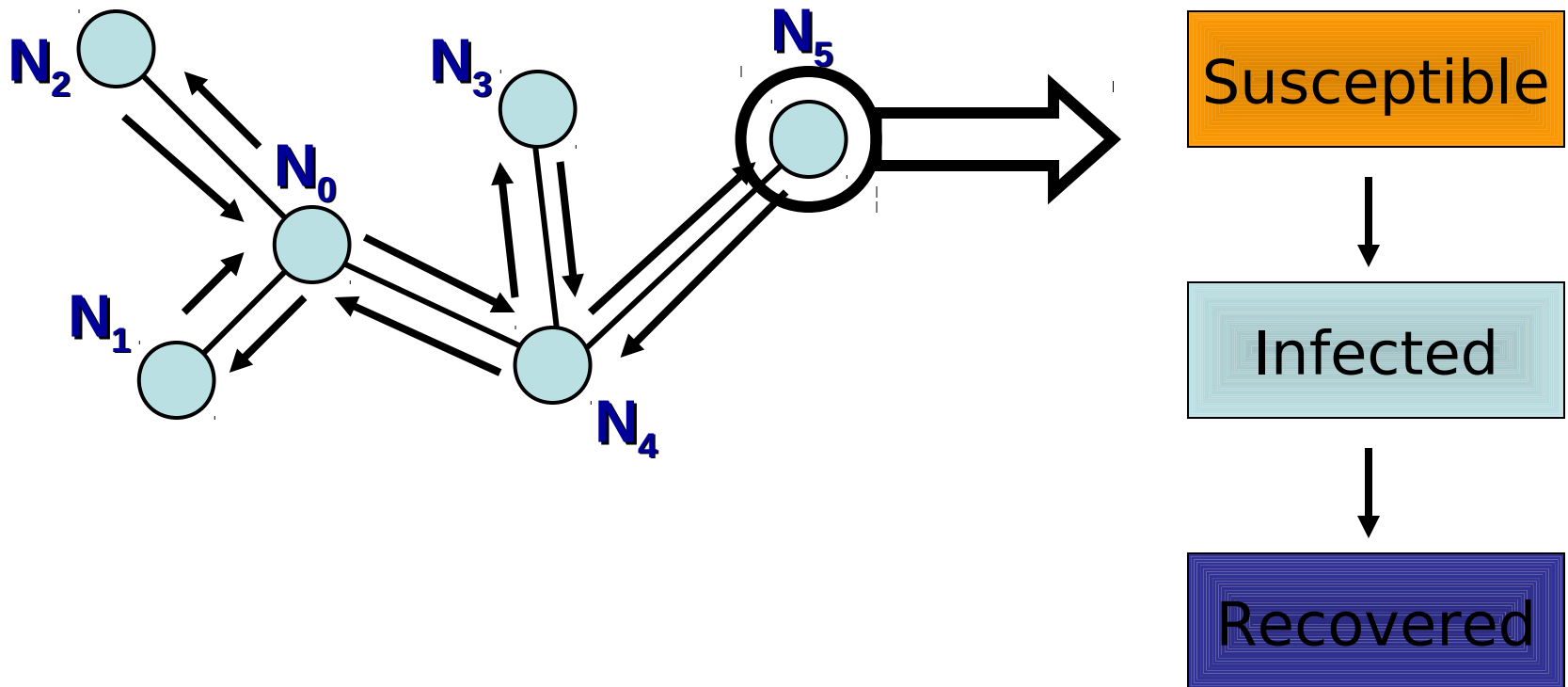
-propagation
à l'intérieur
de chaque ville

-voyage
(transport aérien)
entre les villes



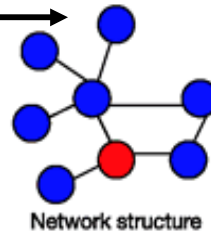
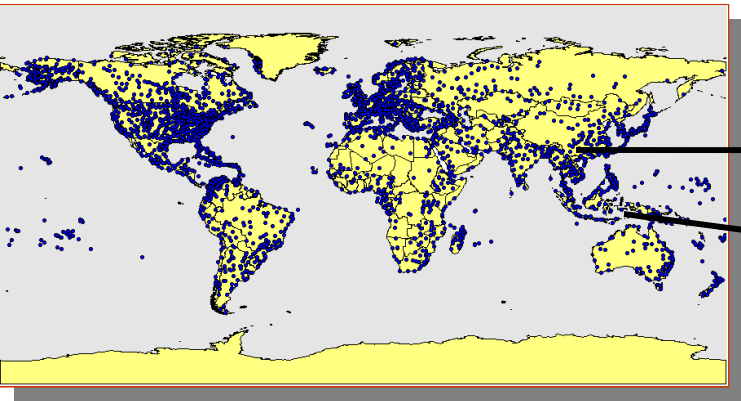
Epidémies: Modèle

modèle "compartimental" + transport aérien



Modèle de type *réaction-diffusion sur réseau*

Réseau de transport aérien



Zones urbaines
+
Flux

Réseau mondial de transport aérien

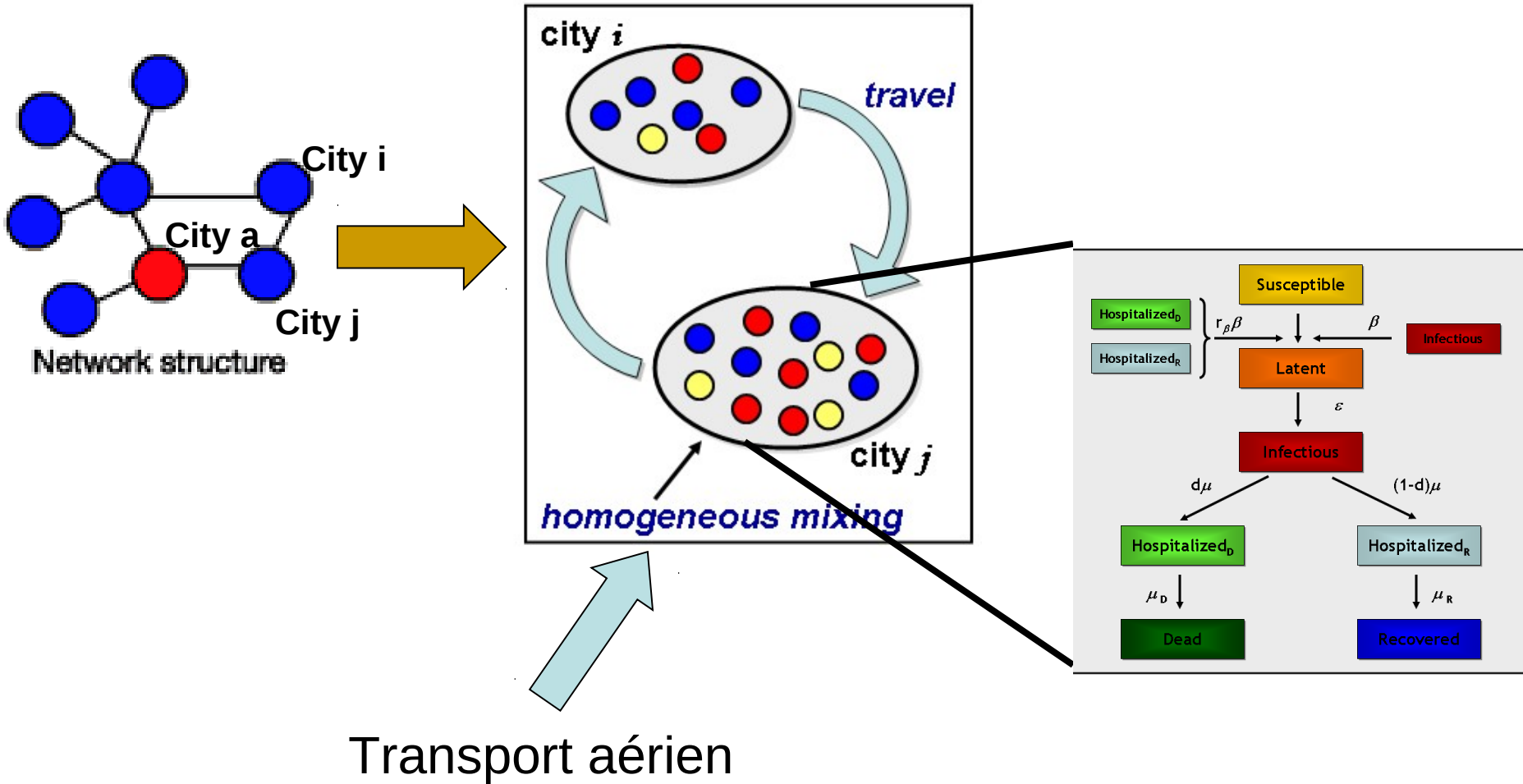
- Base de données **IATA**
 - $V = \underline{3100}$ aéroports
 - $E = \underline{17182}$ liens pondérés
 - w_{ij} #sièges / jour
- N_j population des zones urbaines

> 99% du trafic total

Une fois le modèle construit:

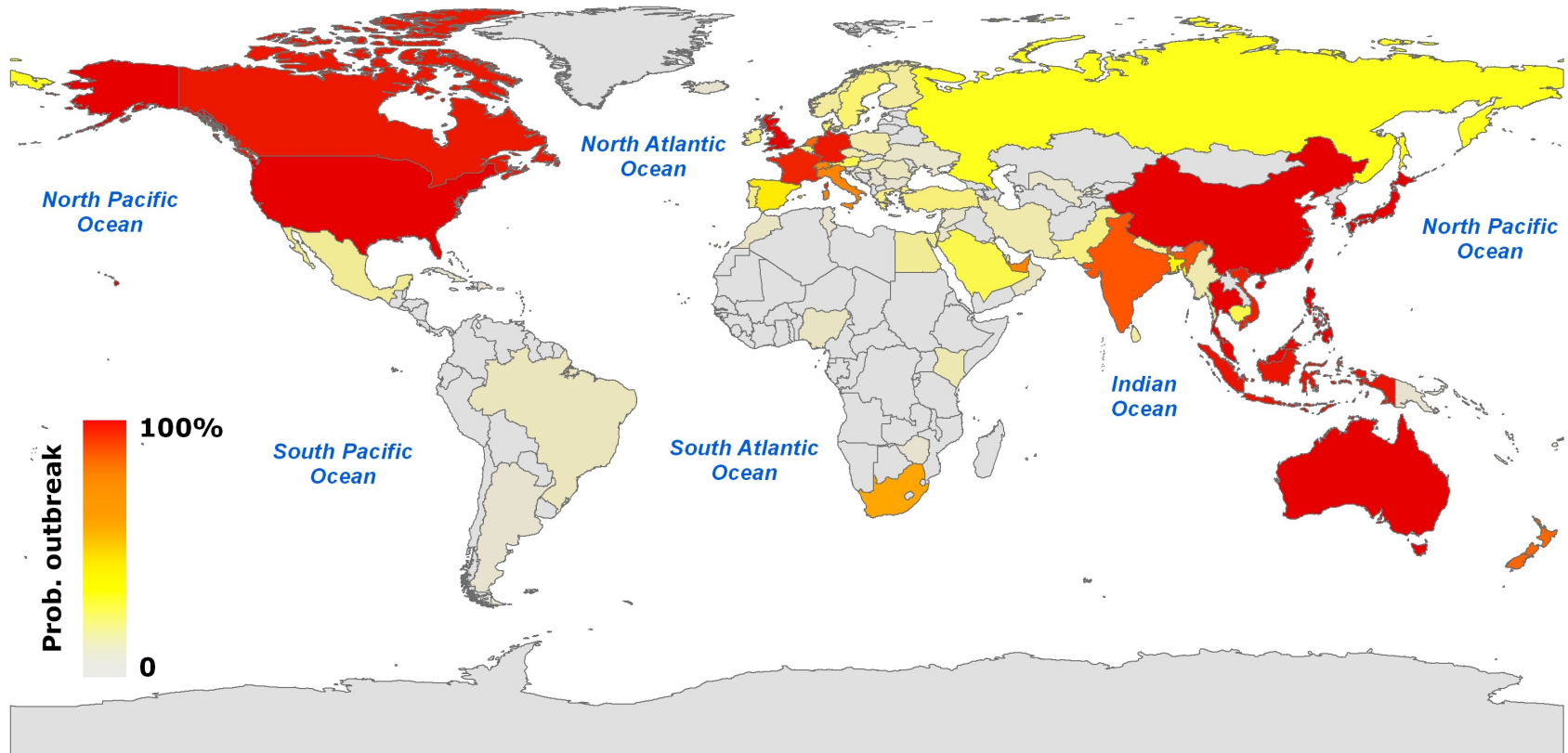
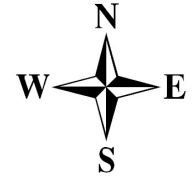
- caractérisation du **réseau de transport** (essentiellement: transport aérien)
- reproduire a posteriori le déroulement d'une épidémie pour **valider** le modèle
- étude, dans le cadre du modèle, de l'influence des différents niveaux de complexité du réseau
- étude de la **prévisibilité**
- étude de **scénarios** de propagation
- étude de **mesures** d'endiguement

Application: l'épidémie de SRAS



Prédiction...

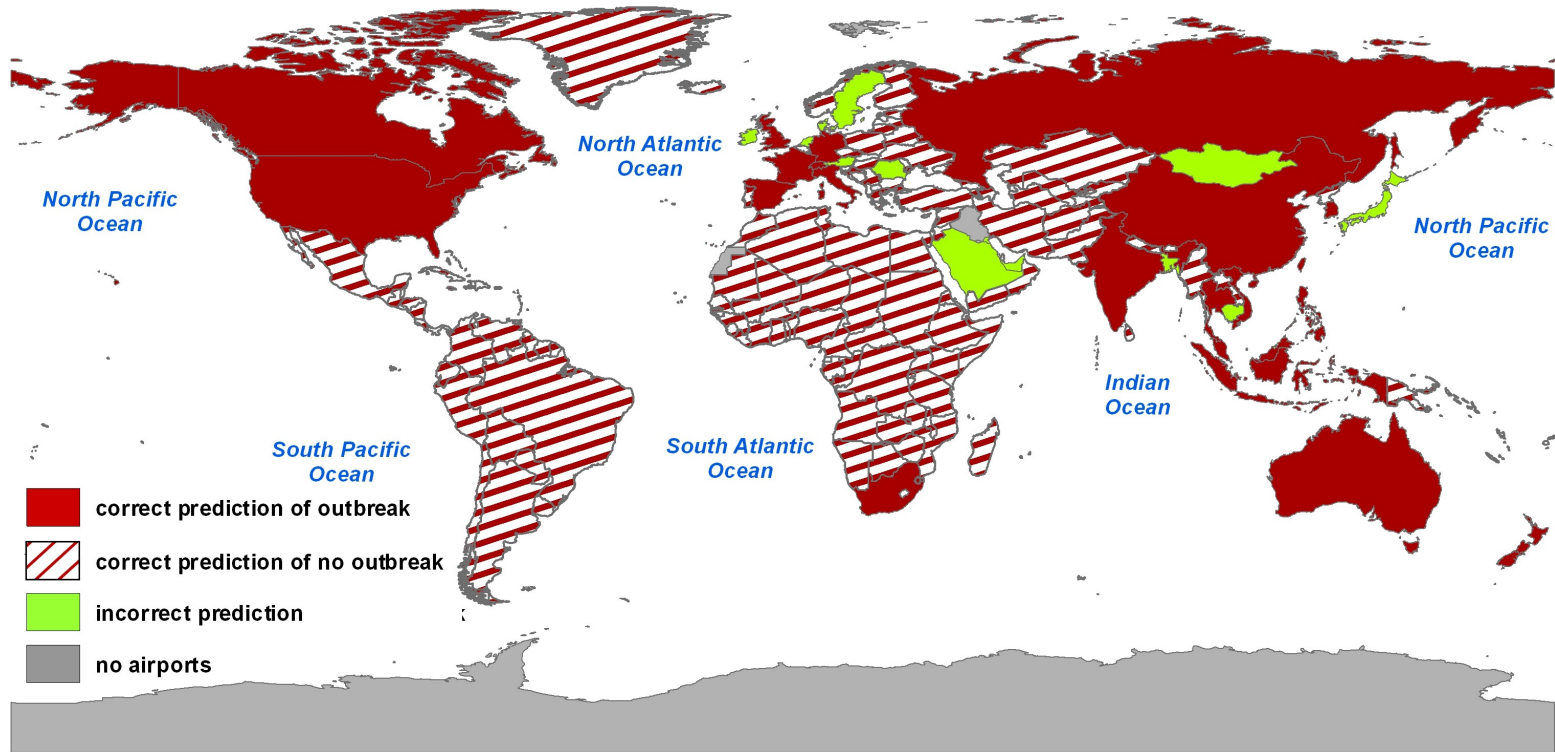
Outbreak likelihood - July 11, 2003



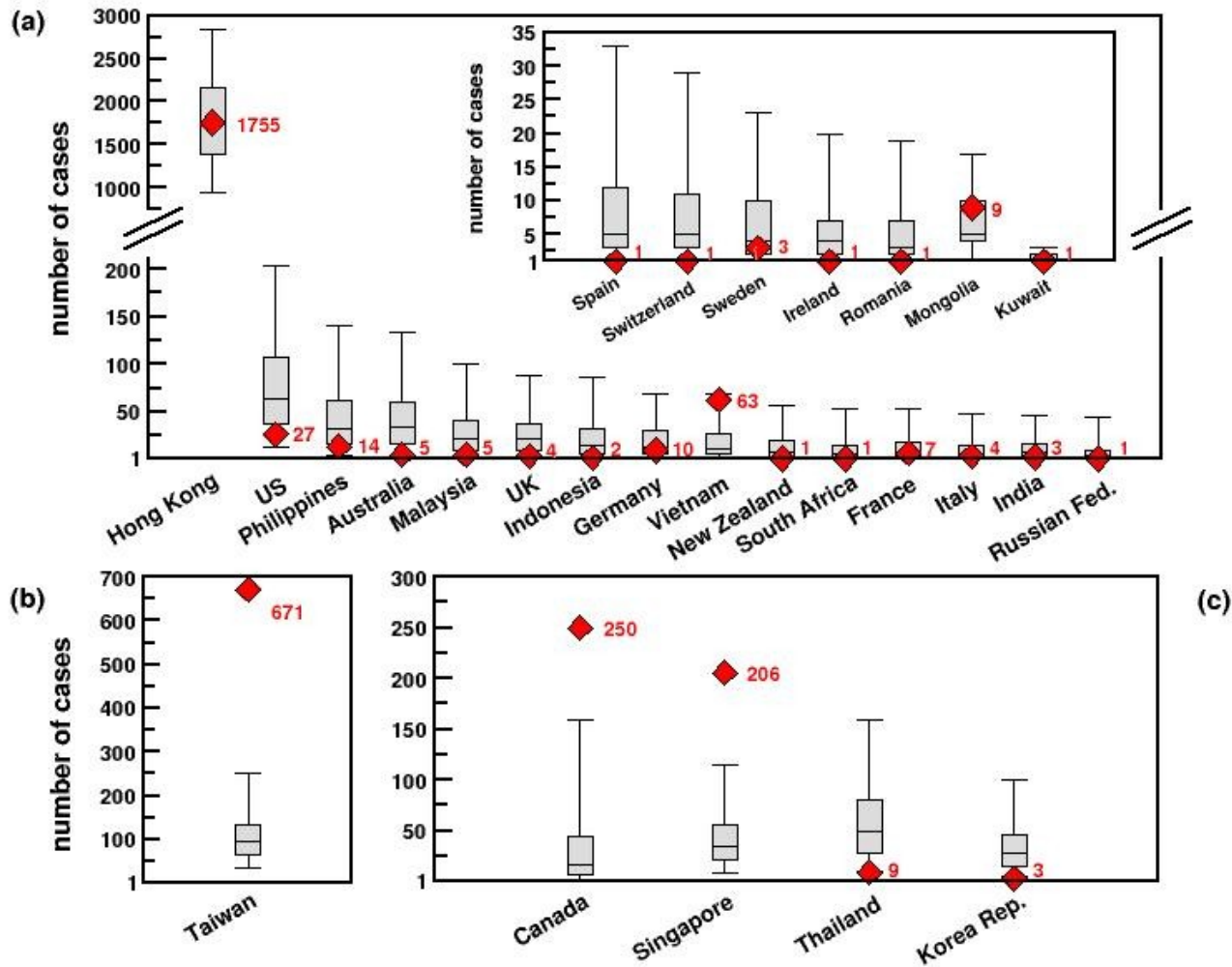
Prédictions...

**Comparison forecasts/empirical data
July 11, 2003**

risk threshold: 20%



Quantitativement

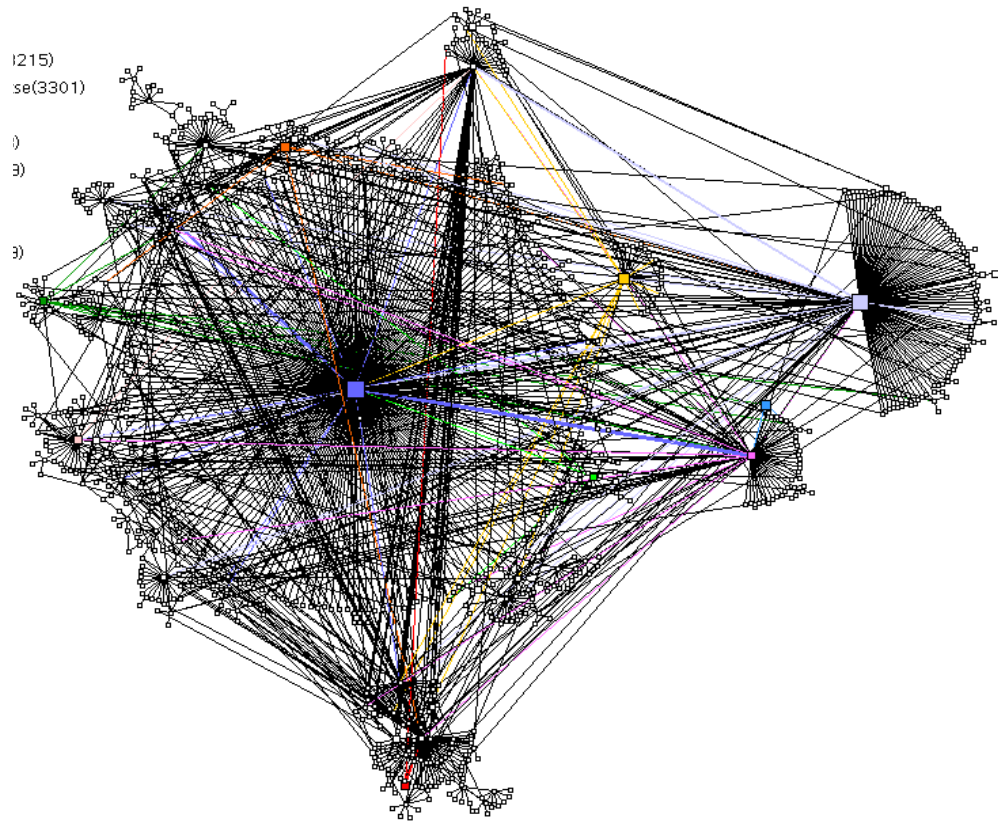


NB: populations de millions de personnes!!

Etonnant?

- Prédictions correctes pour 204 pays sur 220
- Correct quantitativement

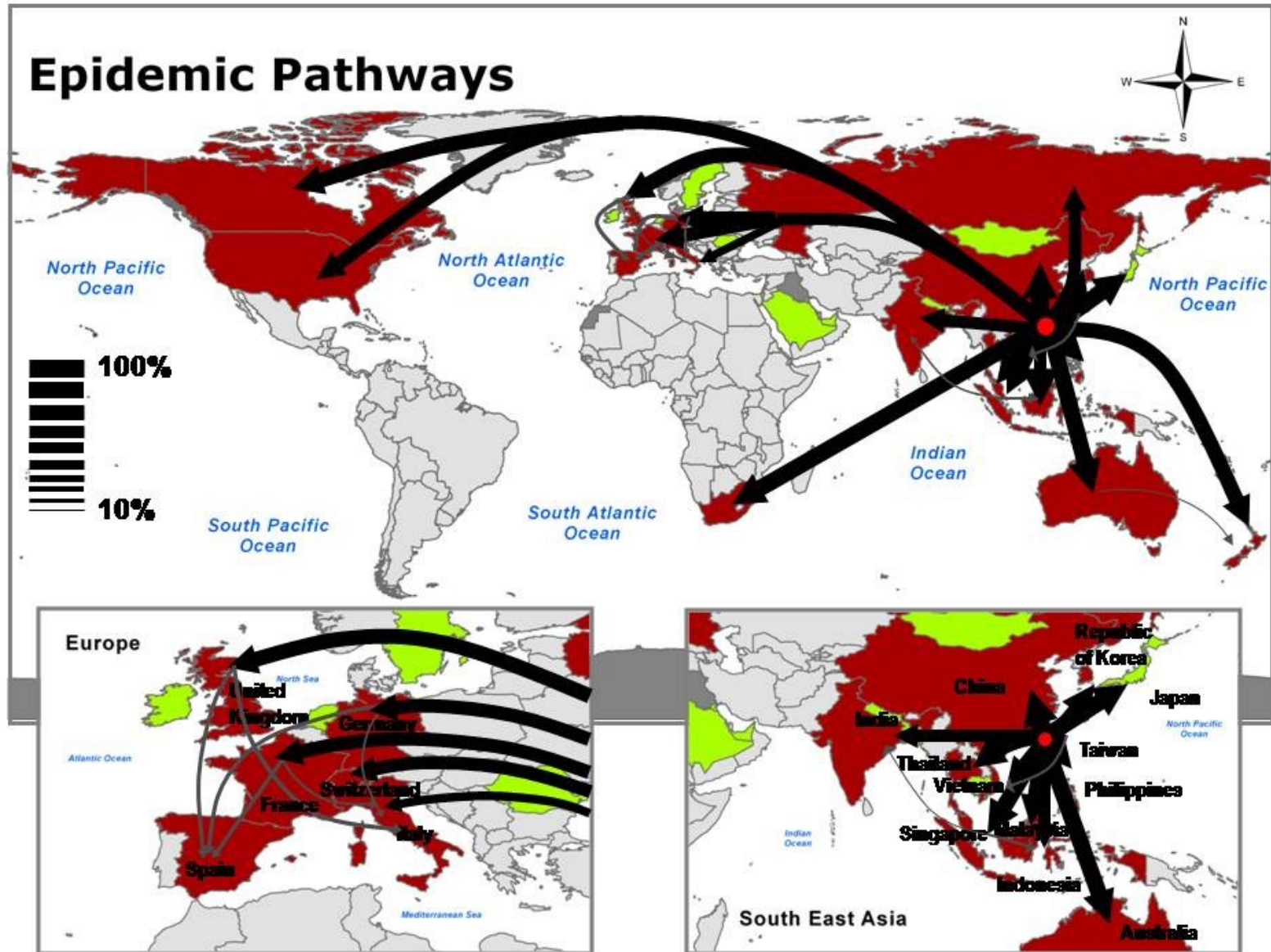
Malgré la complexité en
jeu:
-bruit stochastique
-réseau complexe



L'avantage de la complexité...

- Deux effets opposés
 - Nombreux chemins (**hétérogénéité des degrés**)
 - Sélection par le trafic (accumulation **hétérogène** du trafic sur des chemins spécifiques)
- Définition de ***chemins épidémiques*** par les connexions dominant la propagation

Les chemins de propagation



Développements

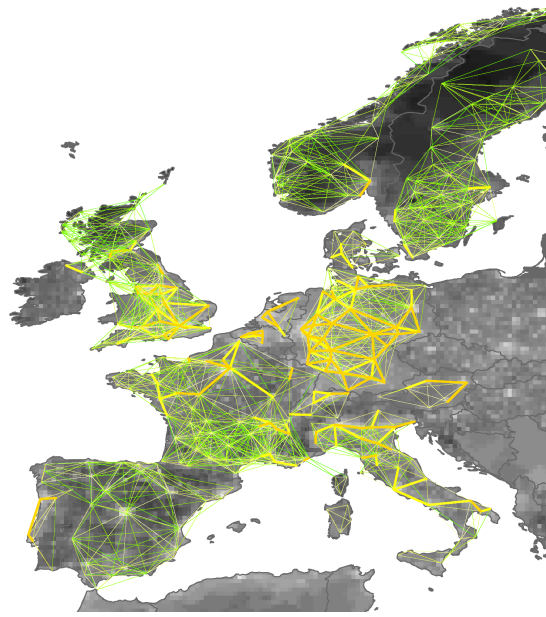
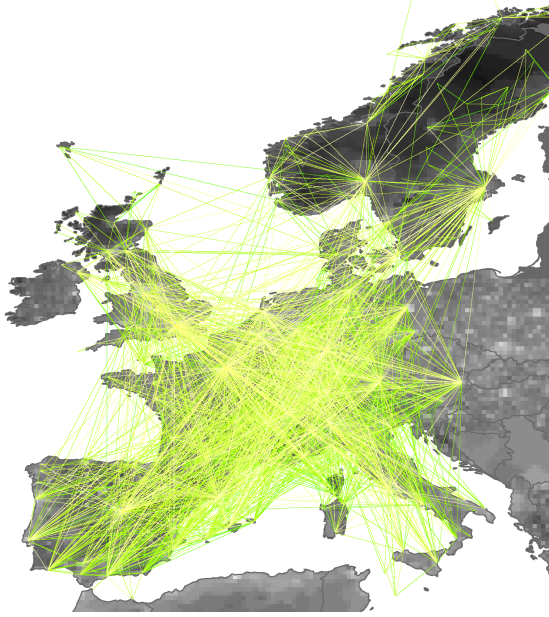
- Intégration de détails supplémentaires dans le modèle:

- autres modes de transport, à l'échelle locale

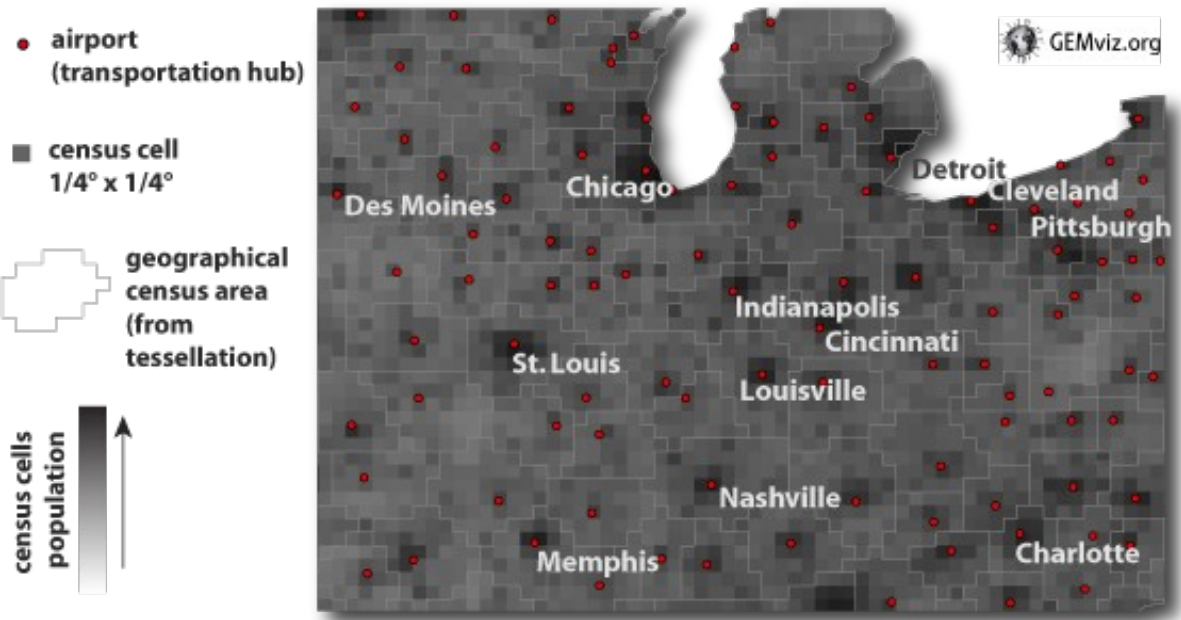
www.gleamviz.org

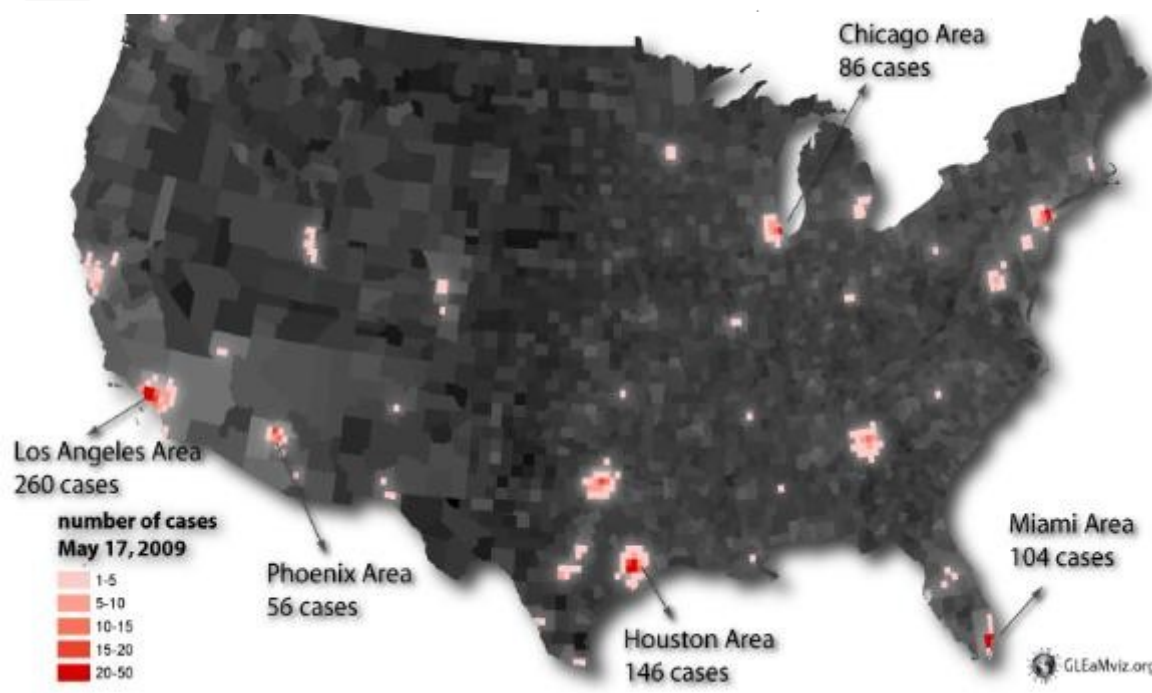
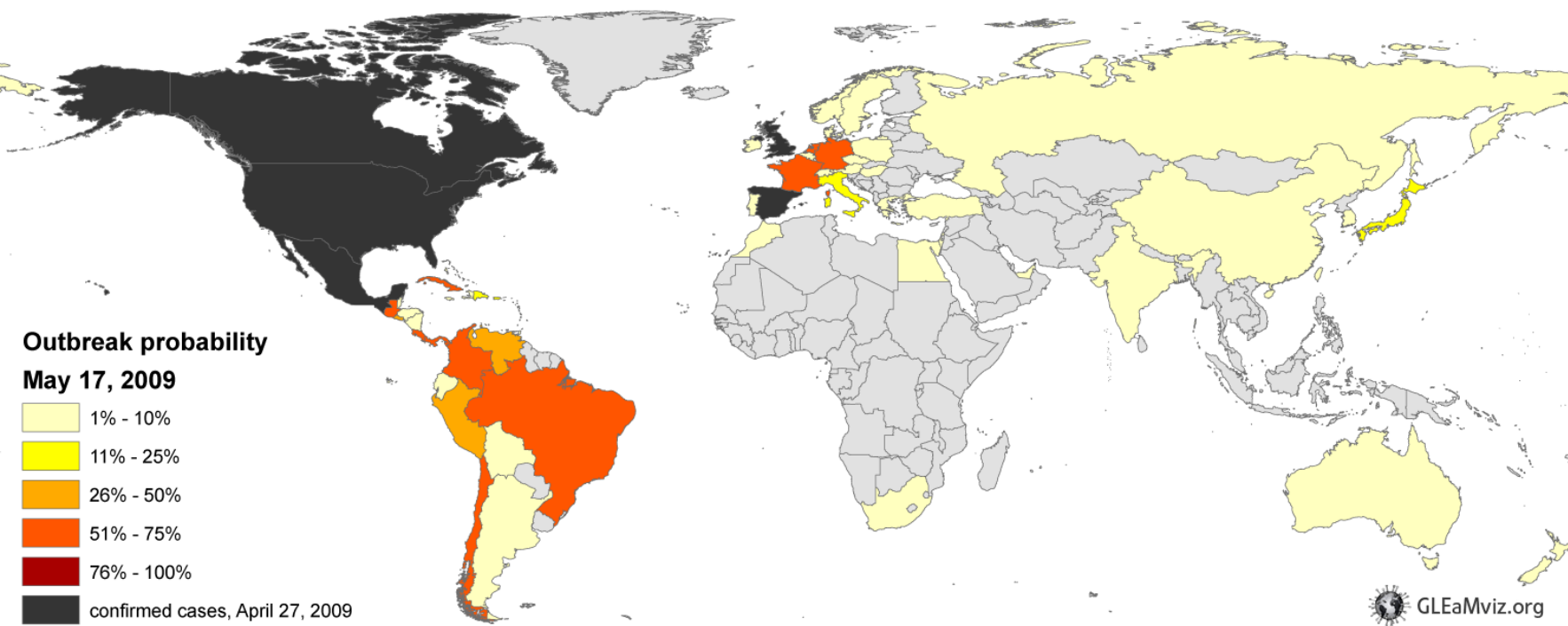
modèle numérique modulable de propagation au niveau mondial, utilisé pendant la pandémie de H1N1

- Hétérogénéité des habitudes de voyage
 - ...
- Réponse des individus à une crise: changement de comportement, etc...

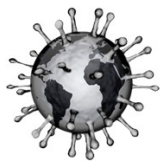


<http://www.gleamviz.org>



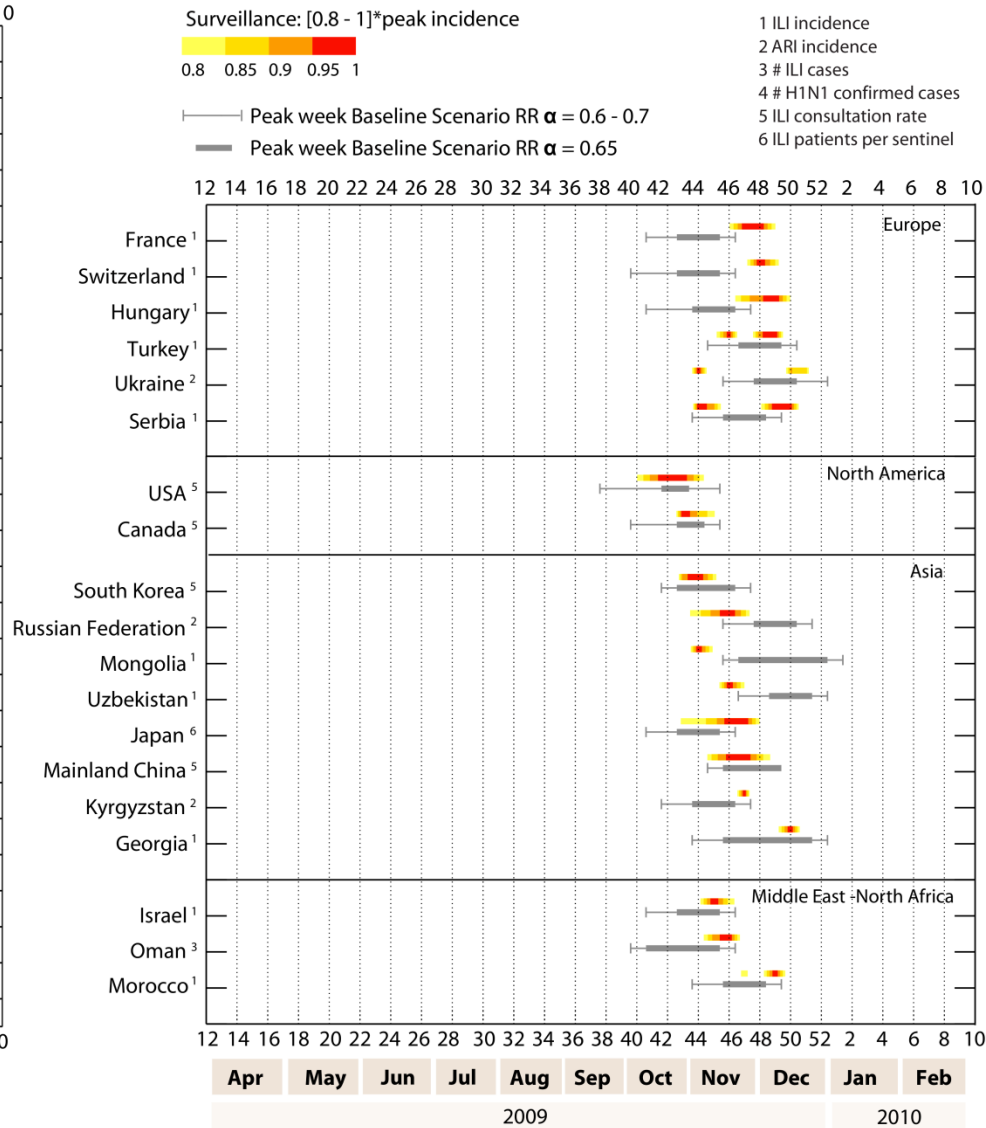
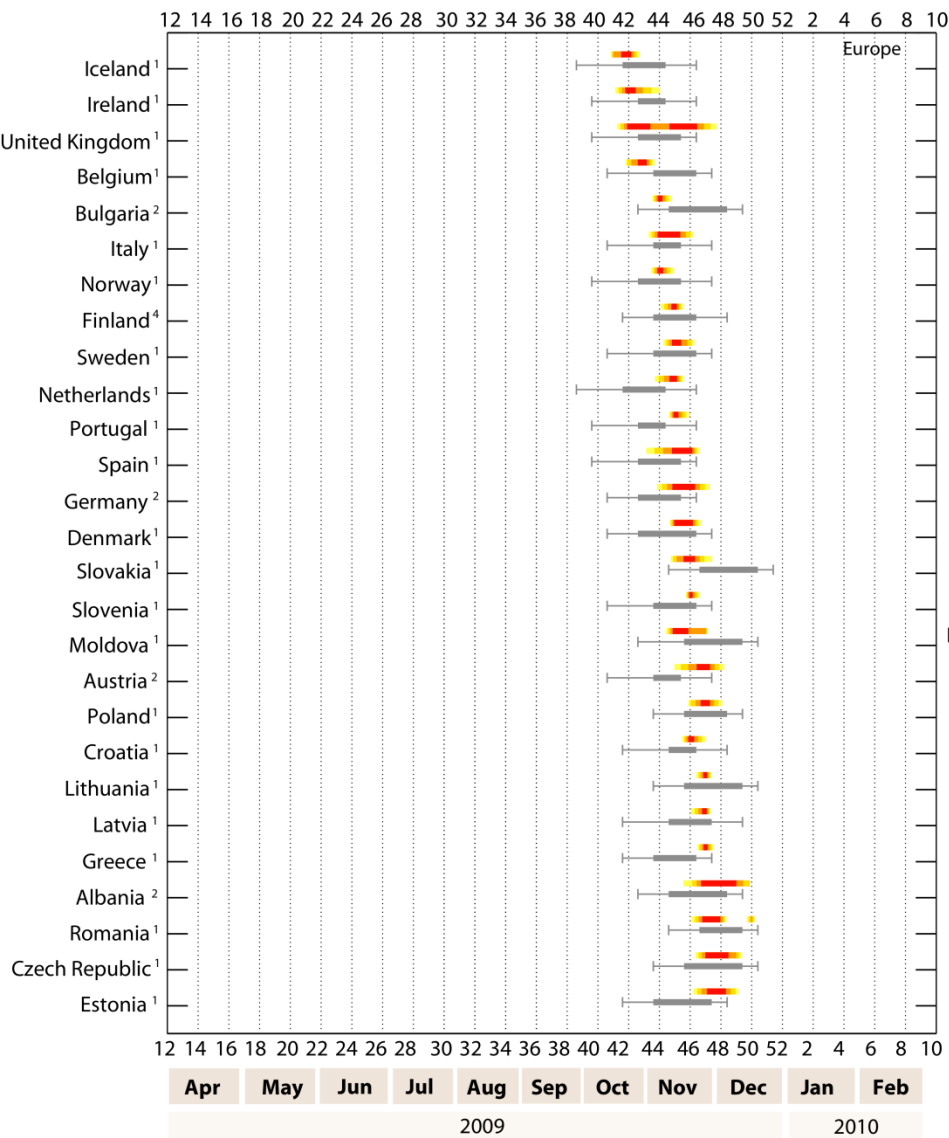


<http://www.gleamviz.org>



comparison with data

<http://www.gleamviz.org>

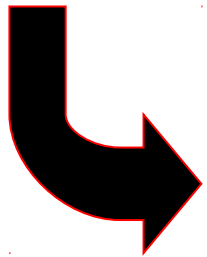


Perspectives

- Réseaux couplés, interdépendants
- Intégration
(ex: réseaux sociaux en ligne- hors ligne)
- Réseaux à plusieurs échelles
(ex: www.gleamviz.org)
- Réseaux dynamiques
(ex: réseaux de transport, réseaux sociaux...)

Réseaux dynamiques

- Quelle dynamique?
- Comment la caractériser?
- Modèles?
- Conséquences sur les phénomènes dynamiques?
(e.g. propagation d'épidémies, d'informations...)



Point fondamental= données empiriques!!!

Dynamique des réseaux sociaux

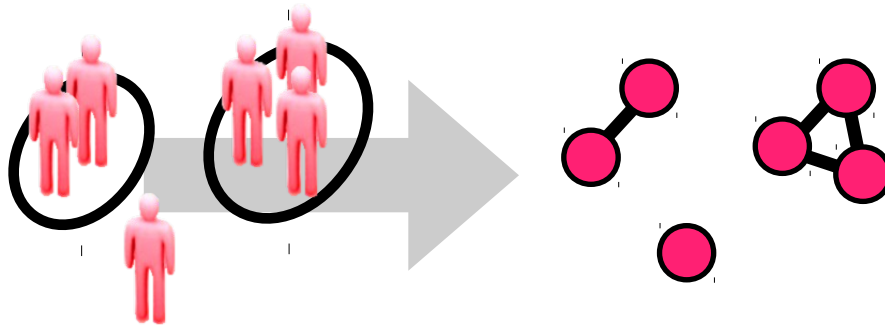
- email (Eckmann et al 2004)
- Téléphones mobiles (Onnela et al, 2007, Gonzalez et al 2009)
 - Localisation
 - Mobilité
 - Réseaux cumulés
- Réseaux d'interaction
 - Bluetooth, wifi (O' Neill et al 2006; Scherrer et al 2008; Eagle, Pentland 2009)
 - MIT Reality mining project (sociometric badges)
 - MOSAR european project (hôpitaux)

Pas de projet de collecte systématique de données à grande échelle dans des environnements divers

Le projet SocioPatterns



Quelles sont les propriétés statistiques et dynamiques du réseau de contact d'individus en interaction sociale?



Haute résolution **spatiale** (\sim m) et **temporelle** ($<$ min)

Détection de contacts



badges RFID actifs, 2.4 Ghz

10

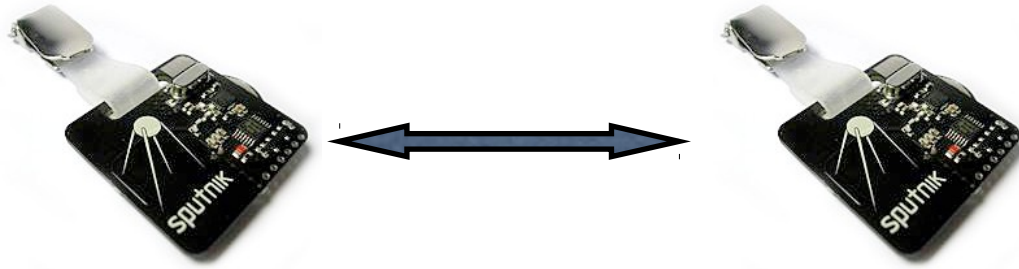
Distance faible (~1m):
Echange de paquets à
très faible puissance

42

"42 a vu 10"



Détection de contacts



- Courte distance (~1 à 2m)
- **Détection de situations de face à face**
- Détection statistique => résolution de 20s
- Petit
- Possible à grande échelle

Déploiements de l'infrastructure

▶ Conférences:

- ▶ Epiwork (Turin, octobre 2008)
- ▶ 25C3 (Berlin, décembre 2008)
- ▶ European Semantic Web Conference (Heraklion, juin 2009, mai 2010)
- ▶ SFHH Congress (Nice, juin 2009)
- ▶ ACM Hypertext (Turin, juin 2009)

▶ Musée:

Infectious exhibition, Science Gallery, Dublin (mi-avril-mi juillet)
=> **flux de visiteurs**

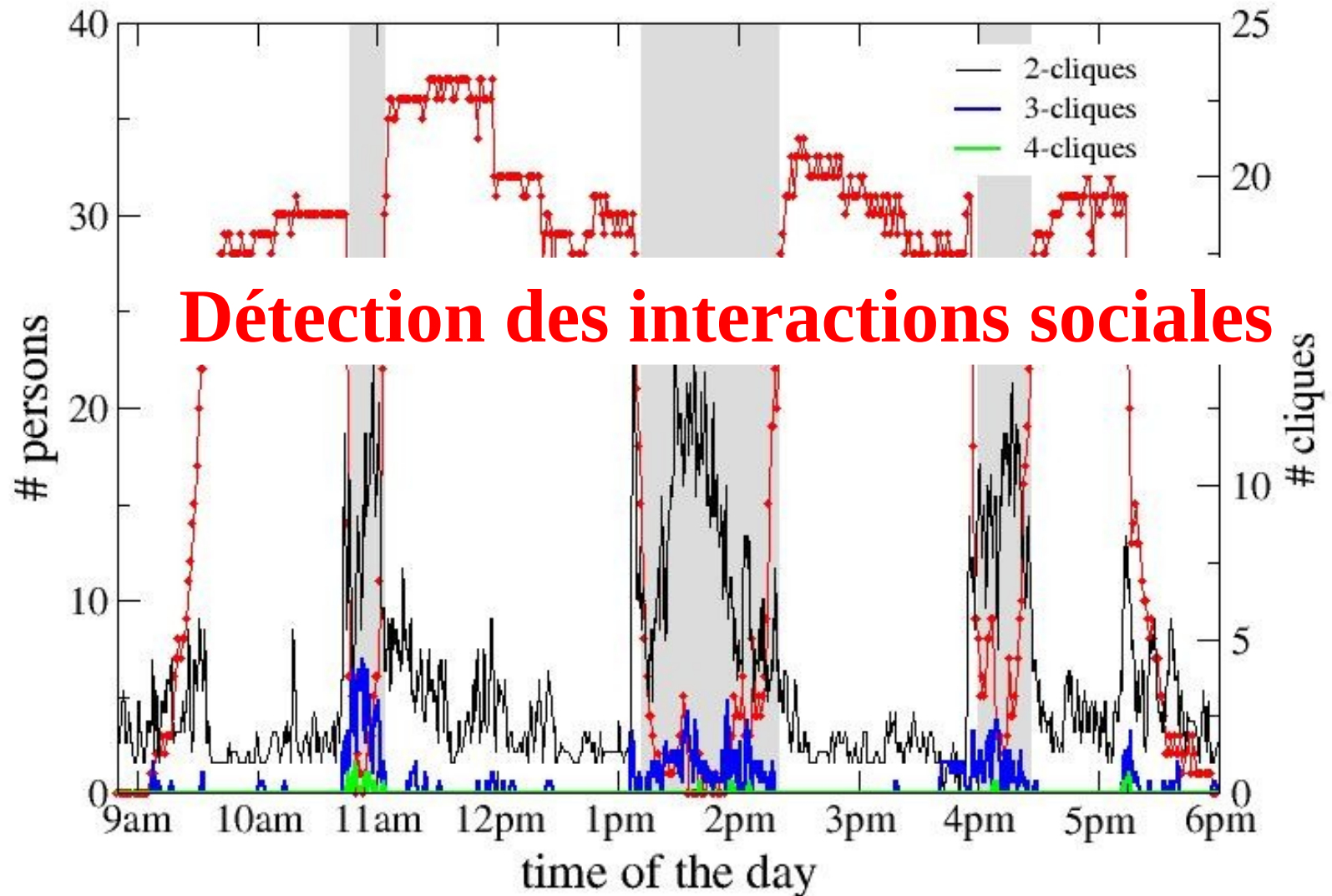
▶ Ecole (Lyon, octobre 2009)

▶ Hôpitaux (Rome, novembre 2009, Lyon, décembre 2010)

▶ Incubateur de start-up (Italie, juillet 2010)

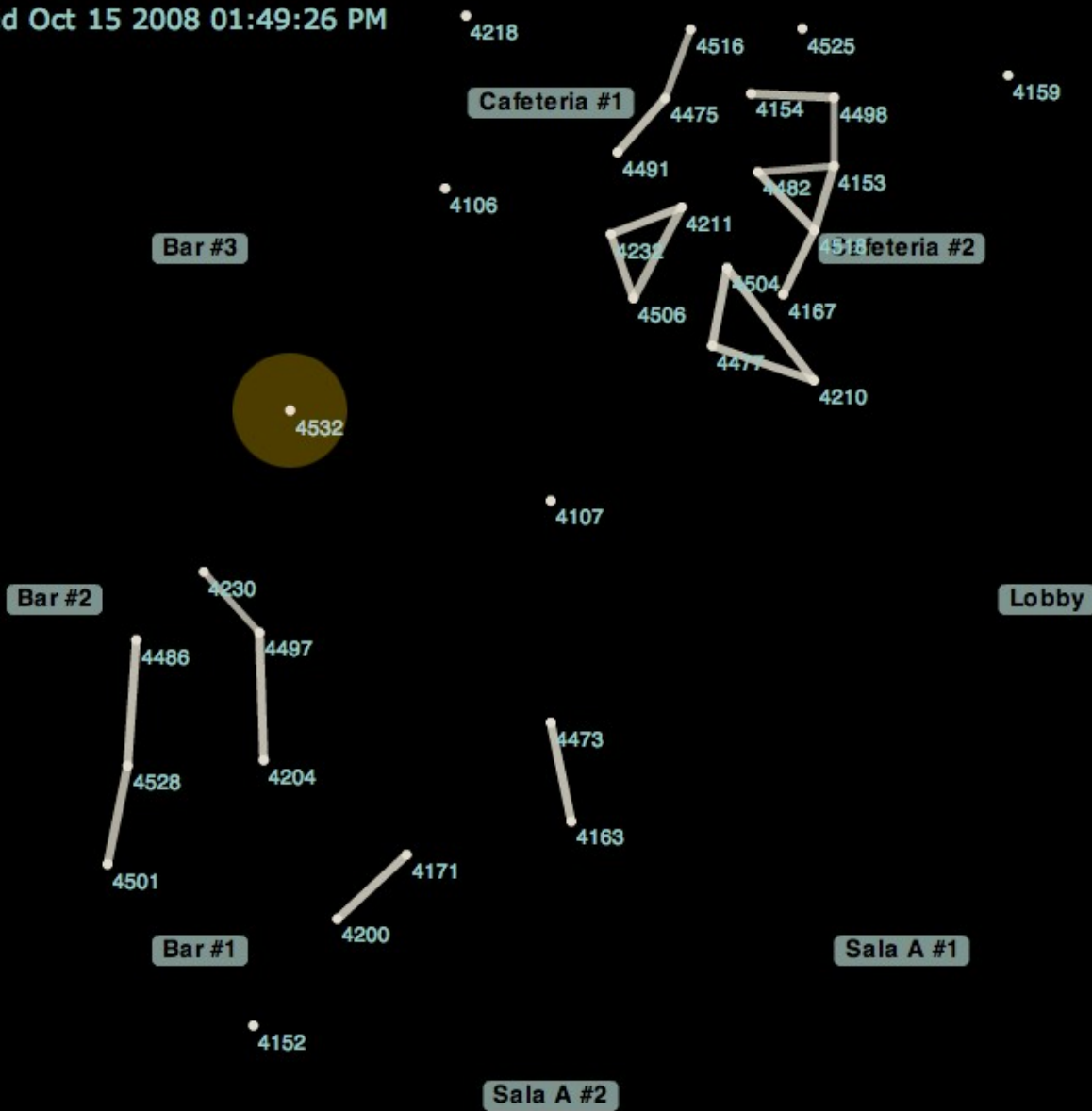
Expérience de détection de contacts

Etude pilote: conférence à ISI, Turin, Italie

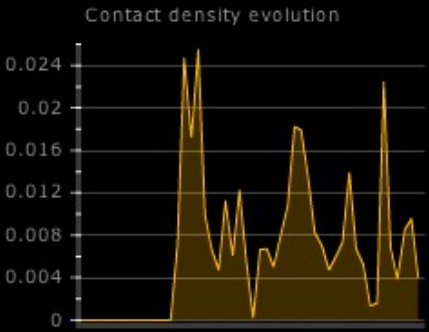


Visualisation

Wed Oct 15 2008 01:49:26 PM



status	on-line
time	0329 mins 30 sec
view	real-time
# stations	9
# beacons	27
# packets	0895391
# curr. sightings	0475
# curr. contacts	0071

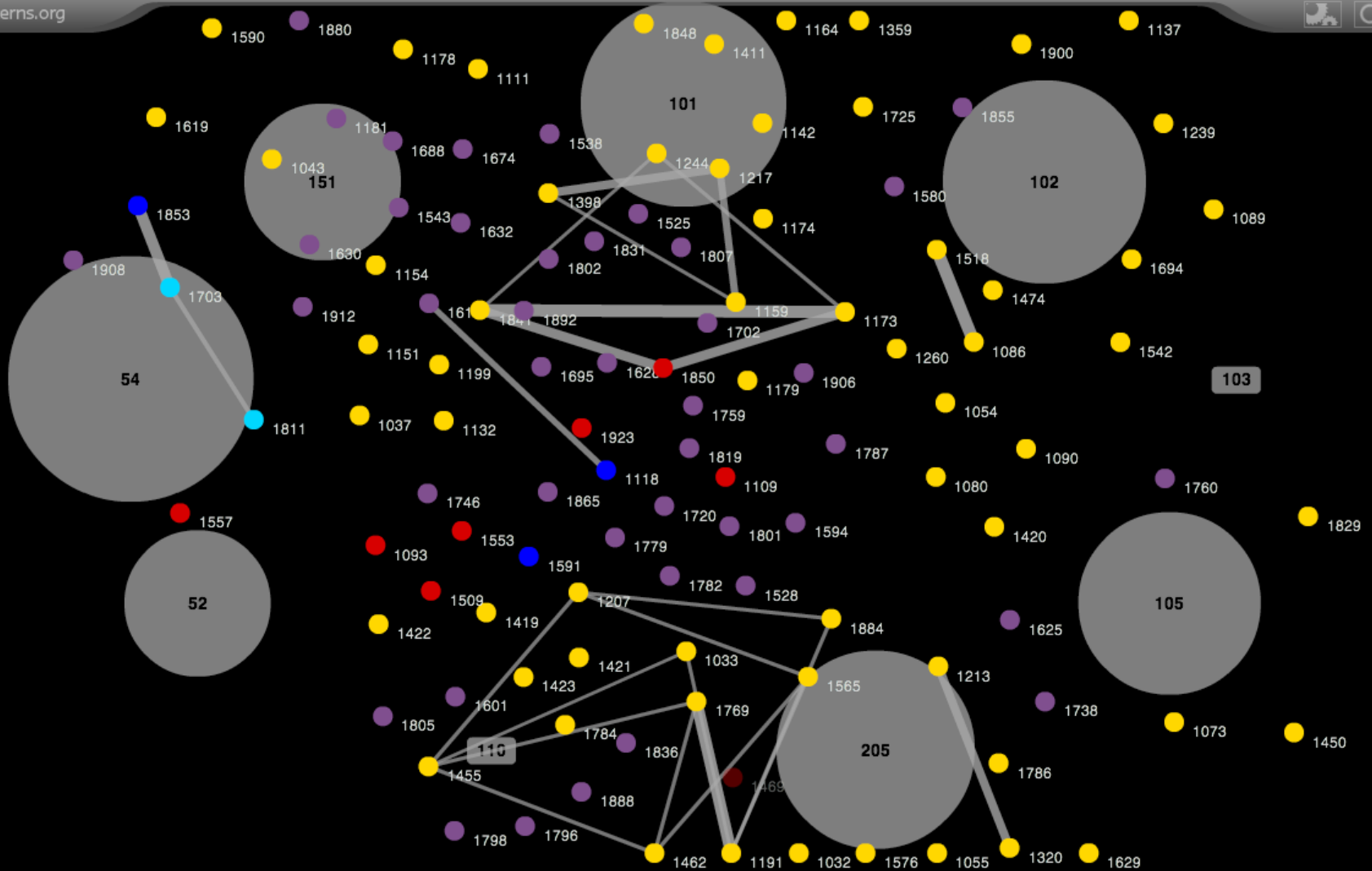


Beacon: 4532	
cum. time	749m 40s
presence	42%
in contact	42%
#1 contact	4215
#2 contact	4198
#3 contact	4158

Hôpital

SocioPatterns Spatial View [24]

SocioPatterns.org

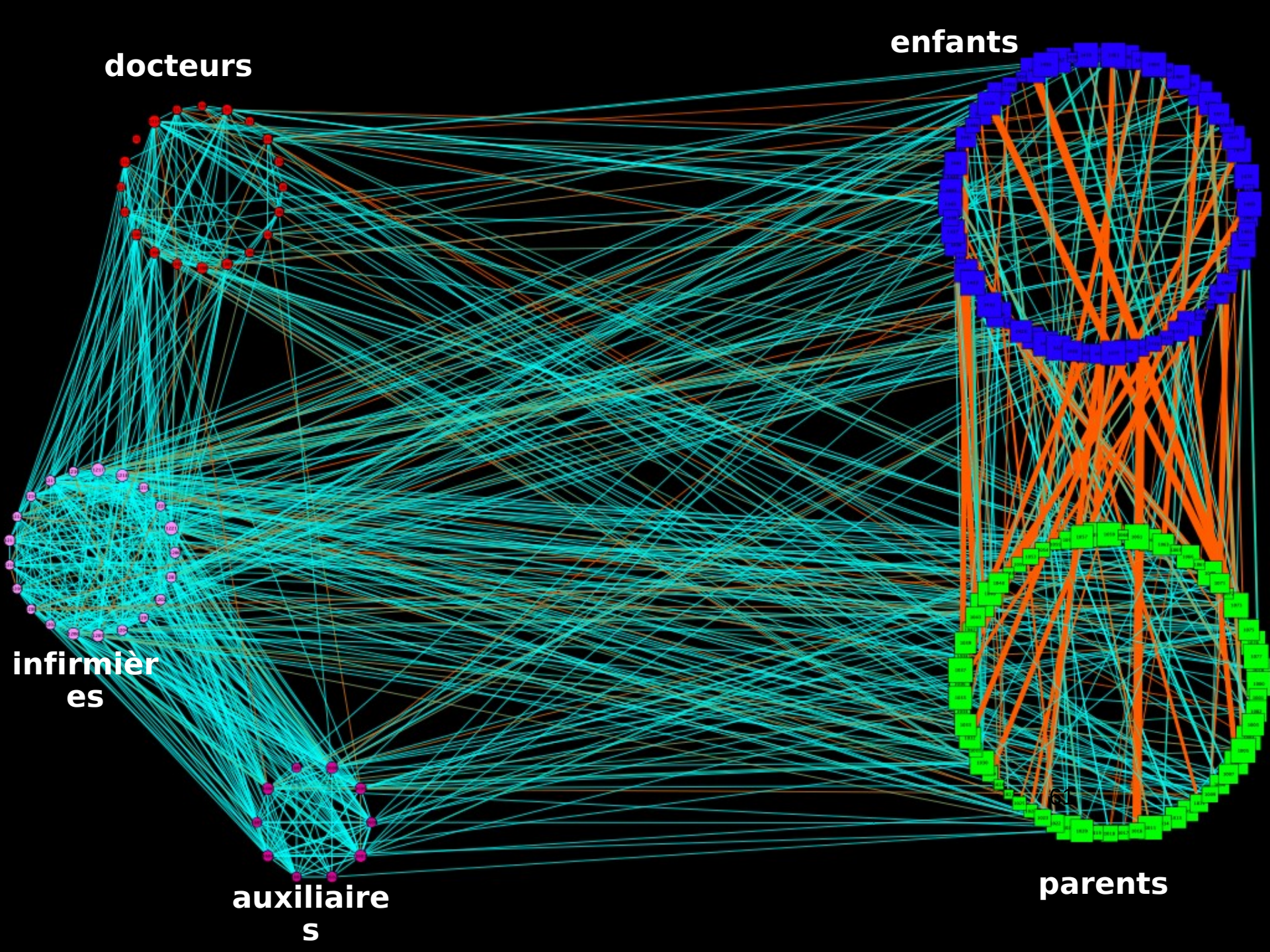


Hôpital

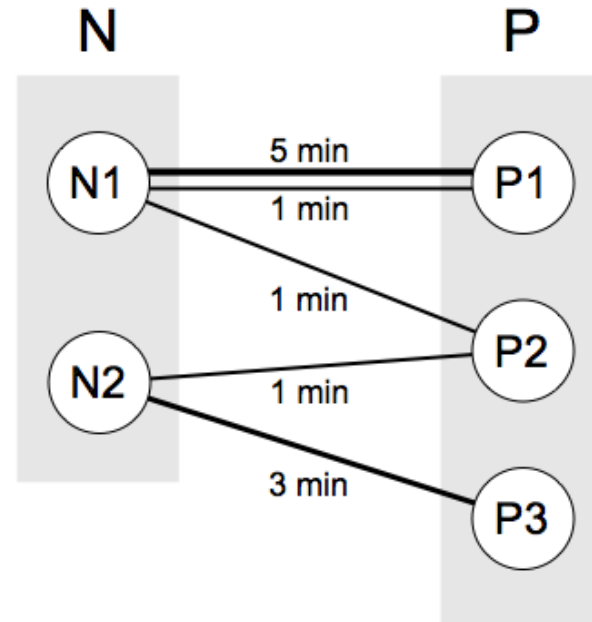
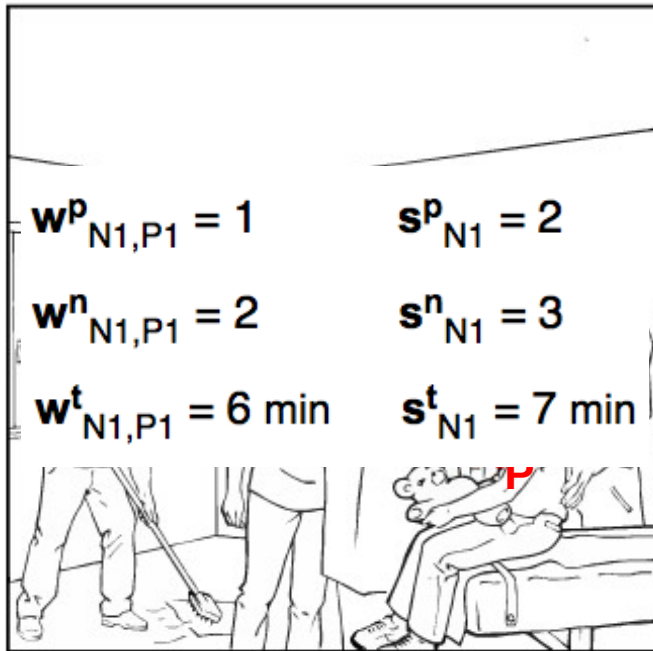
12 jours
~250 personnes



Text



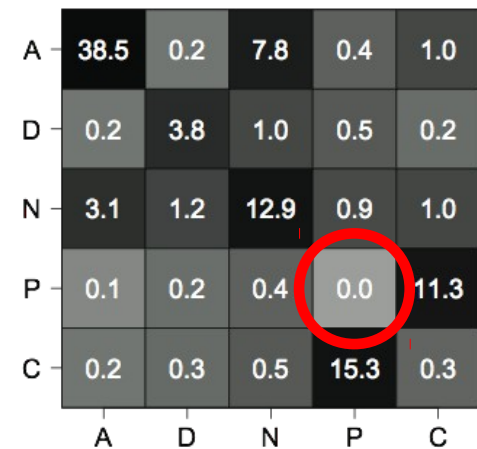
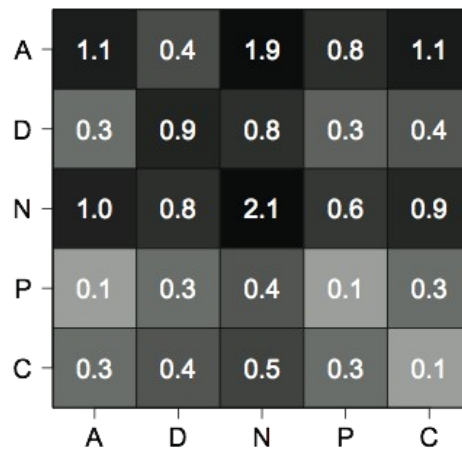
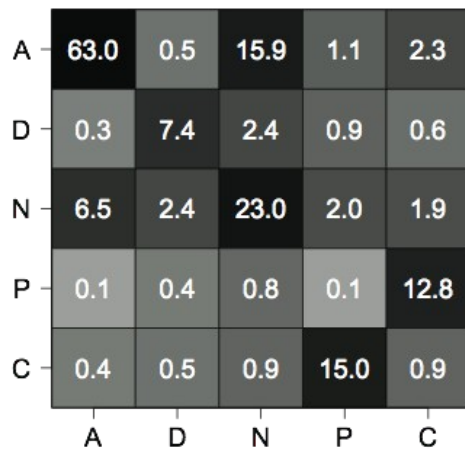
Matrices de contact



number of contacts s^n

number of distinct contacts s^p

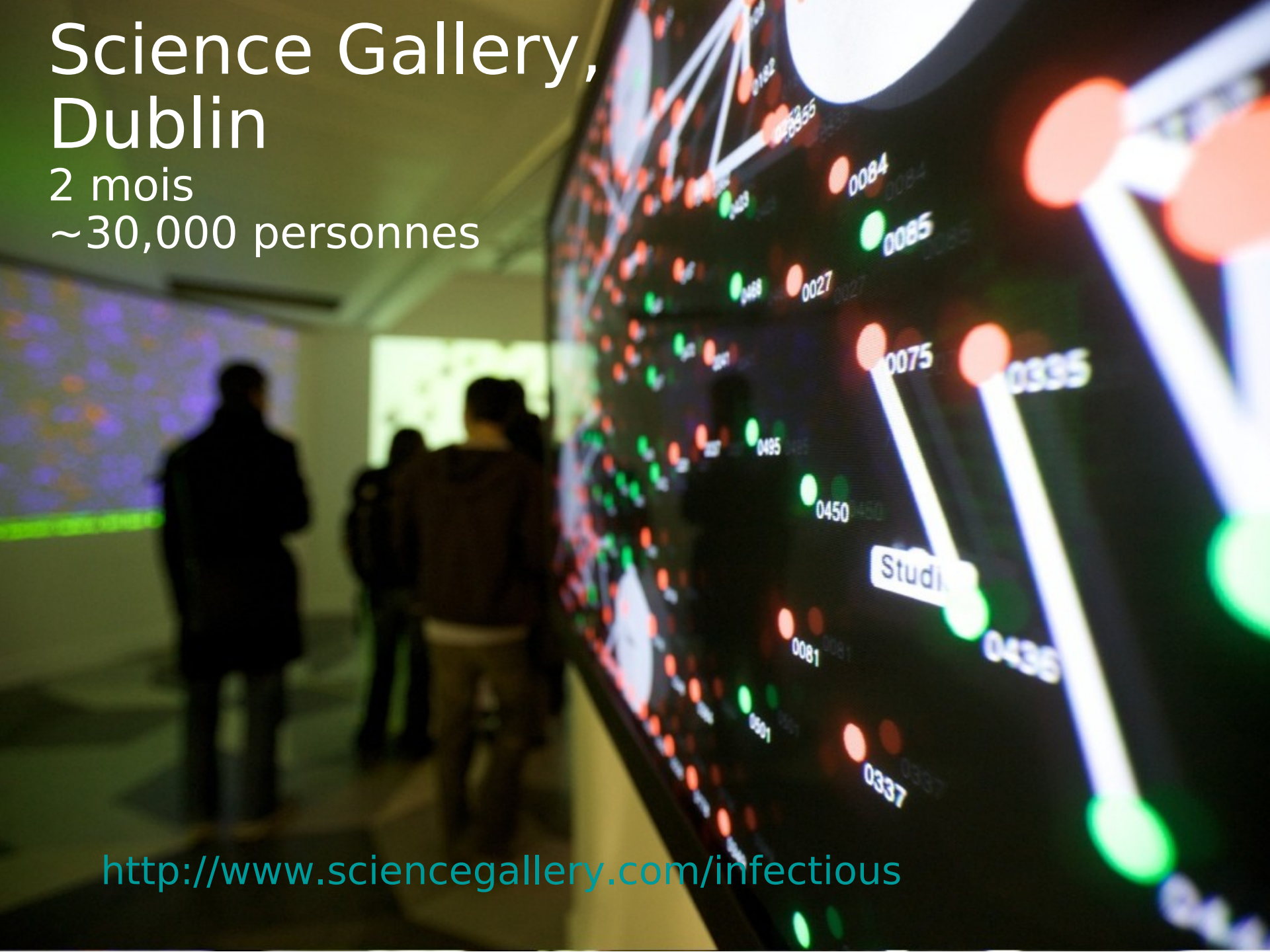
cumulative time in contact s^t (min)



Science Gallery, Dublin

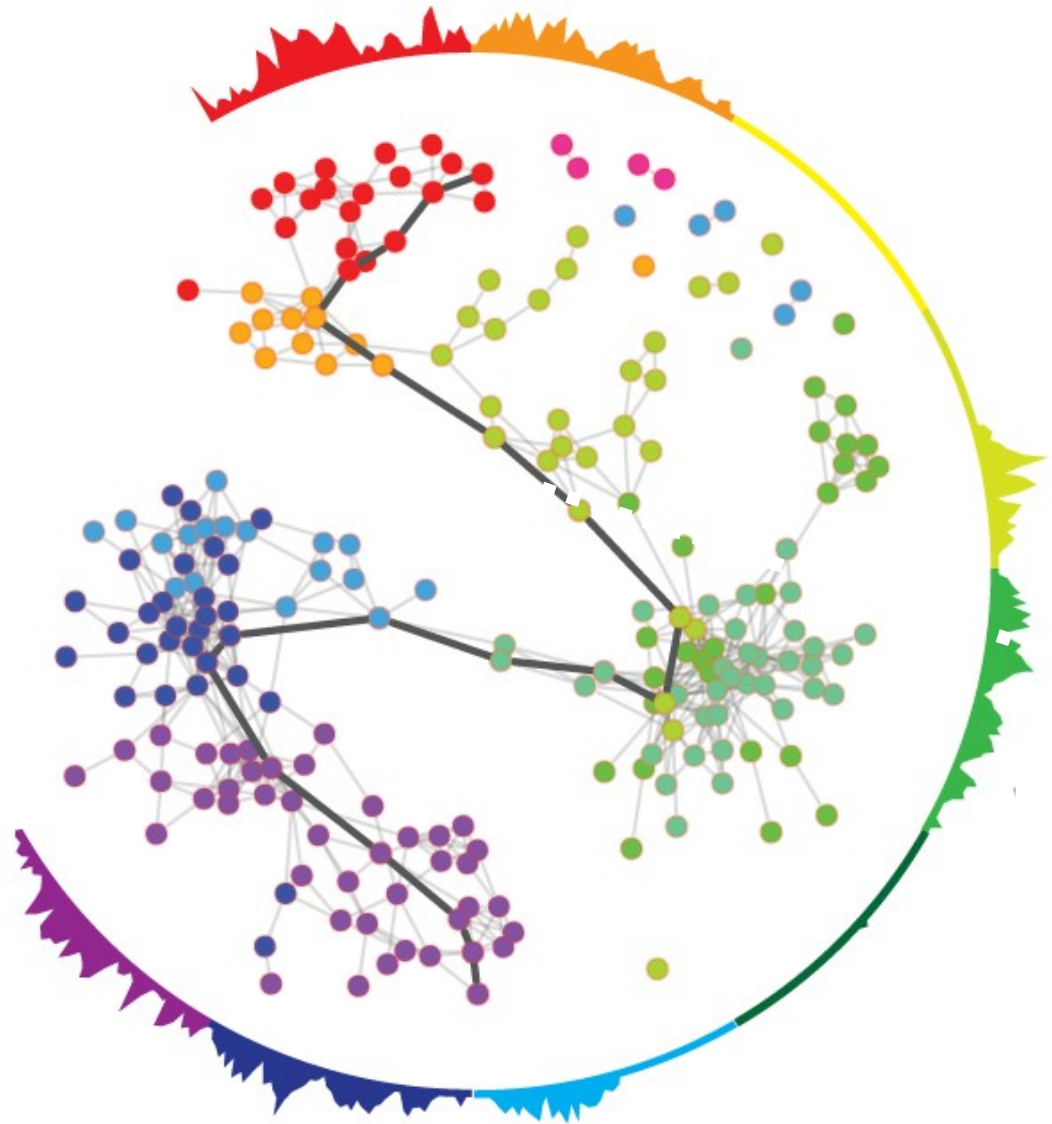
2 mois

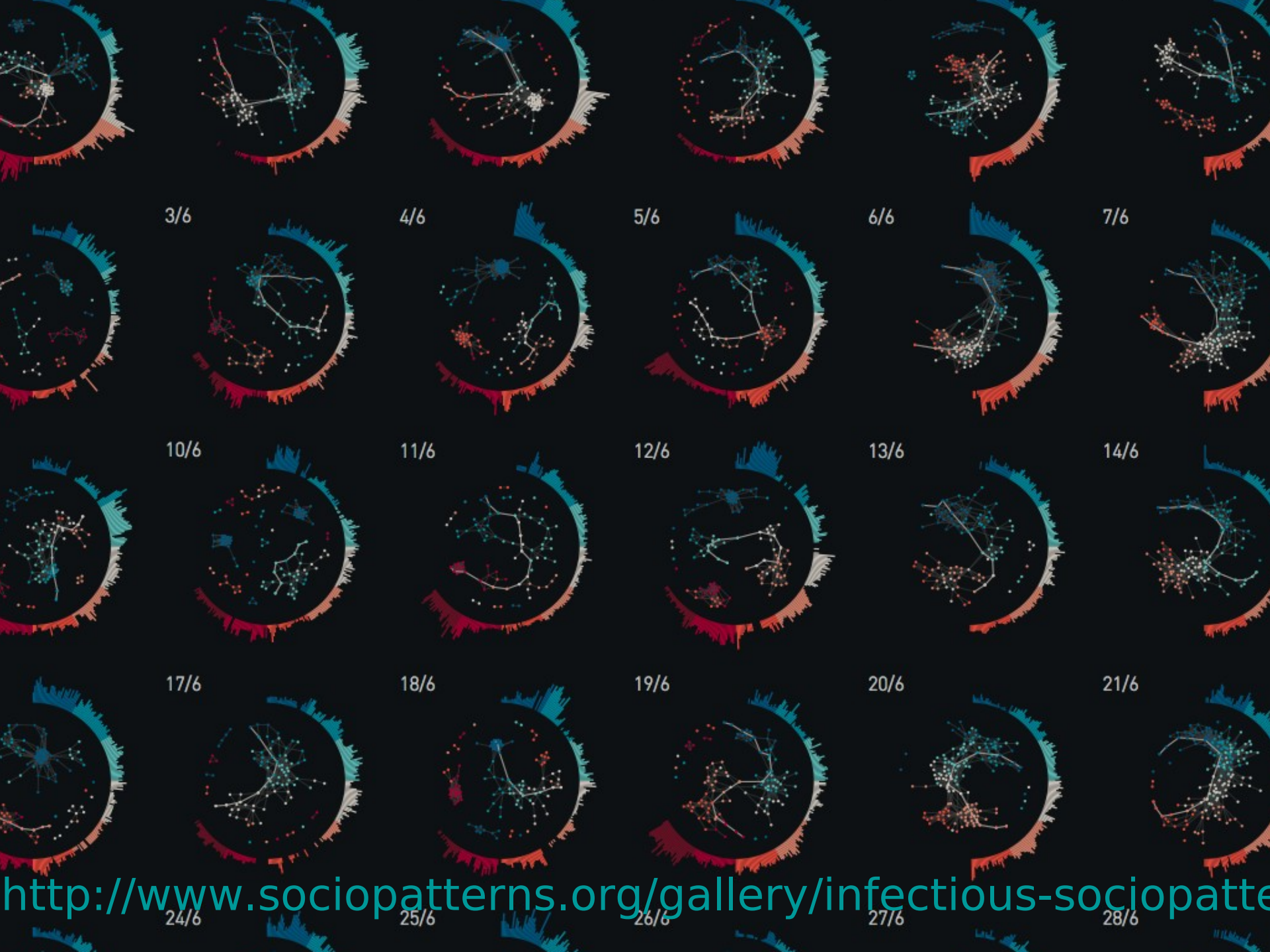
~30,000 personnes



<http://www.sciencegallery.com/infectious>

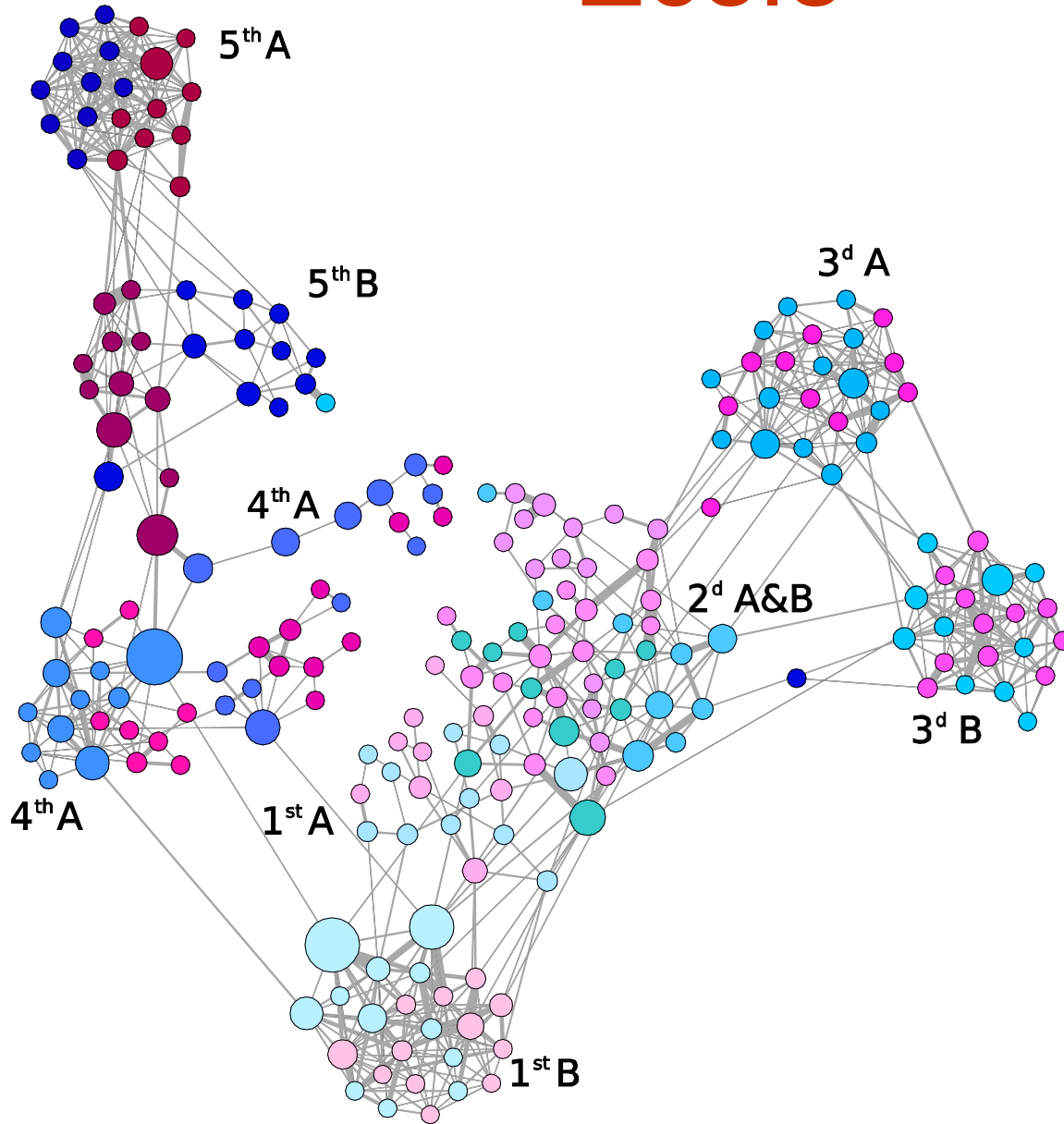
Musée



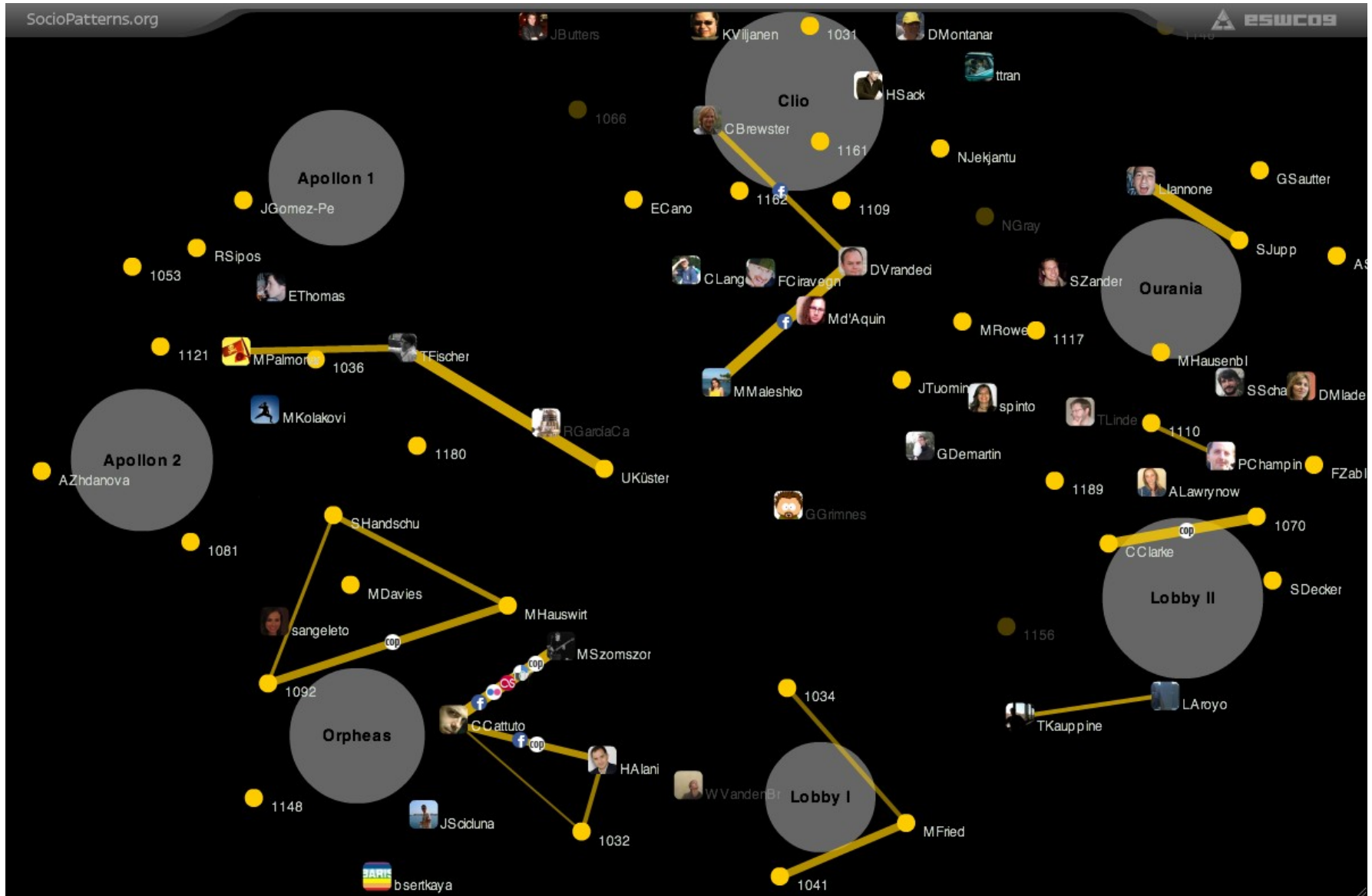


<http://www.sociopatterns.org/gallery/infectious-sociopatte>

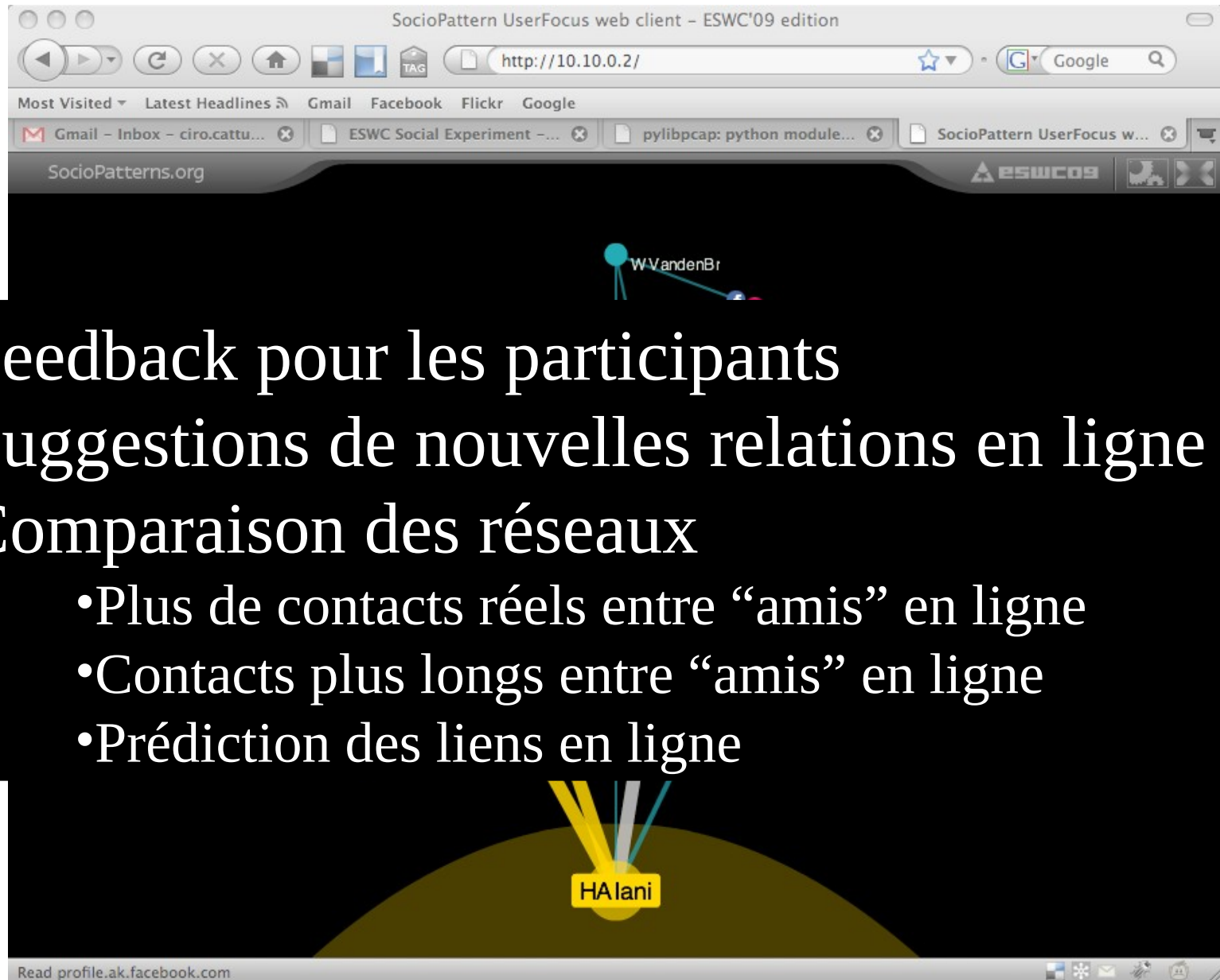
Ecole



Réseaux sociaux réels vs en-ligne



Réseaux sociaux en ligne



- Feedback pour les participants
- Suggestions de nouvelles relations en ligne
- Comparaison des réseaux
 - Plus de contacts réels entre “amis” en ligne
 - Contacts plus longs entre “amis” en ligne
 - Prédiction des liens en ligne

Perspectives/travail en cours

- ▶ contextes très divers
conférences, bureaux, musée, école, hôpital
=> analyse des données
- ▶ dynamiques humaines
- ▶ réseaux dynamiques
 - ▶ caractérisation, définition de nouveaux outils
 - ▶ modèles
 - ▶ processus dynamiques, en particulier: épidémiologie
- ▶ réseaux sociaux, lien avec réseaux en-ligne
- ▶ nouvelle génération de badges
=> déploiements longue durée

ISI Foundation
Complex Systems Lagrange LAB

Ciro Cattuto
Alain Barrat
Wouter Van den Broeck
Alessandro Vespignani
Vittoria Colizza
Lorenzo Isella
Marco Quaggiotto
André Panisson

ENS Lyon
Laboratoire de Physique

Jean-François Pinton

SocioPatterns

CNRS Marseille
Centre de Physique Théorique

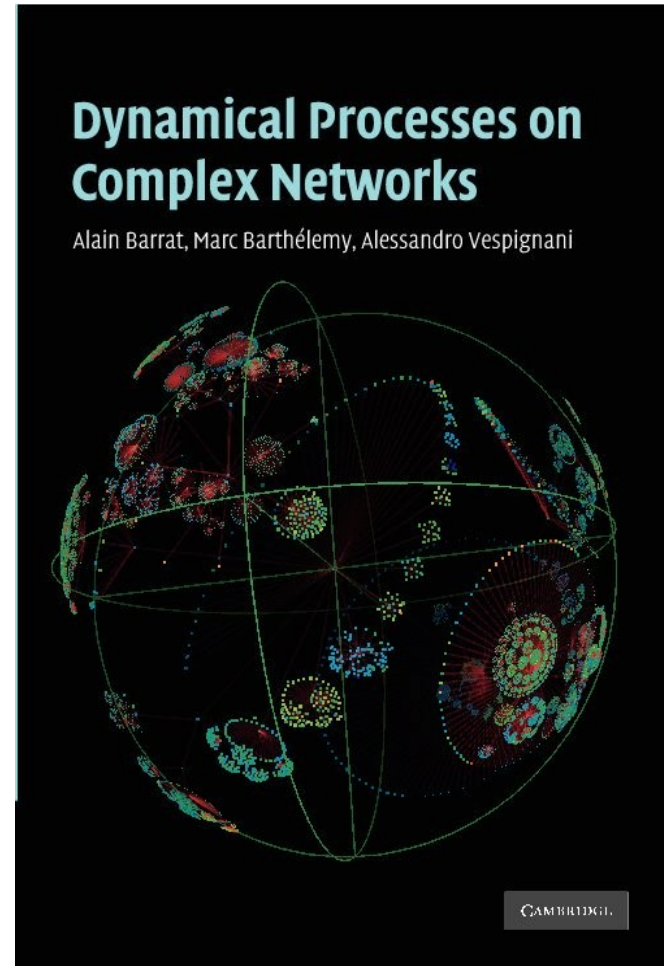
Alain Barrat
Juliette Stehlé
Anna Machens
Arnab Chatterjee

Bitmanufaktur

Milosch Meriac
Brita Meriac



- <http://www.cpt.univ-mrs.fr/~barrat>
- <http://sites.google.com/site/cxnets>
- <http://www.sociopatterns.org>



(Recent) collaborators

SocioPatterns project:

Ciro Cattuto (ISI, Turin)

Wouter Van den Broeck (ISI, Turin)

Vittoria Colizza (ISI, Turin)

Lorenzo Isella (ISI, Turin)

André Panisson (ISI, Turin & Politecnico, Turin)

Jean-François Pinton (ENS Lyon)

Anna Machens (CPT, Marseille)

Juliette Stehlé (CPT, Marseille)

Arnab Chatterjee (CPT, Marseille)

Alessandro Vespignani (Indiana University & ISI)