

Thèse pour obtenir le grade de

Docteur en sciences de l'Université Pierre et Marie Curie

spécialité Informatique

Une approche pour l'estimation fiable des propriétés de la topologie d'Internet

Elie Rotenberg

Rapporteurs

Bertrand Jouve

Professeur, Lyon Lumière 2

Jean-Jacques Pansiot

Professeur émérite, Strasbourg

Examineurs

Clémence Magnien

Chargée de recherche, CNRS

Pascal Mérindol

Maître de conférences, Strasbourg

Philippe Owezarski

Directeur de recherches, CNRS

Directeur

Matthieu Latapy

Directeur de recherches, CNRS

Co-directeur

Christophe Crespelle

Maître de conférences, UCBL

Organisation de l'exposé

1. Topologie d'Internet : enjeux et problématiques
2. Distribution de degrés au niveau logique
3. Distribution de degrés au niveau physique
4. Tables de transmission
5. Conclusions et perspectives

Topologie d'Internet : enjeux et problématiques

À quoi sert Internet ?

Internet est le support de très nombreuses applications : Web, Email, musique, vidéo, achats...

Couche	Exemple
Application	HTTP
Transport	TCP
Réseau	IP
Données-lien	MAC/Ethernet

Toutes ces activités utilisent le même réseau fondamental pour communiquer entre les différentes parties.

Transport d'information sur Internet

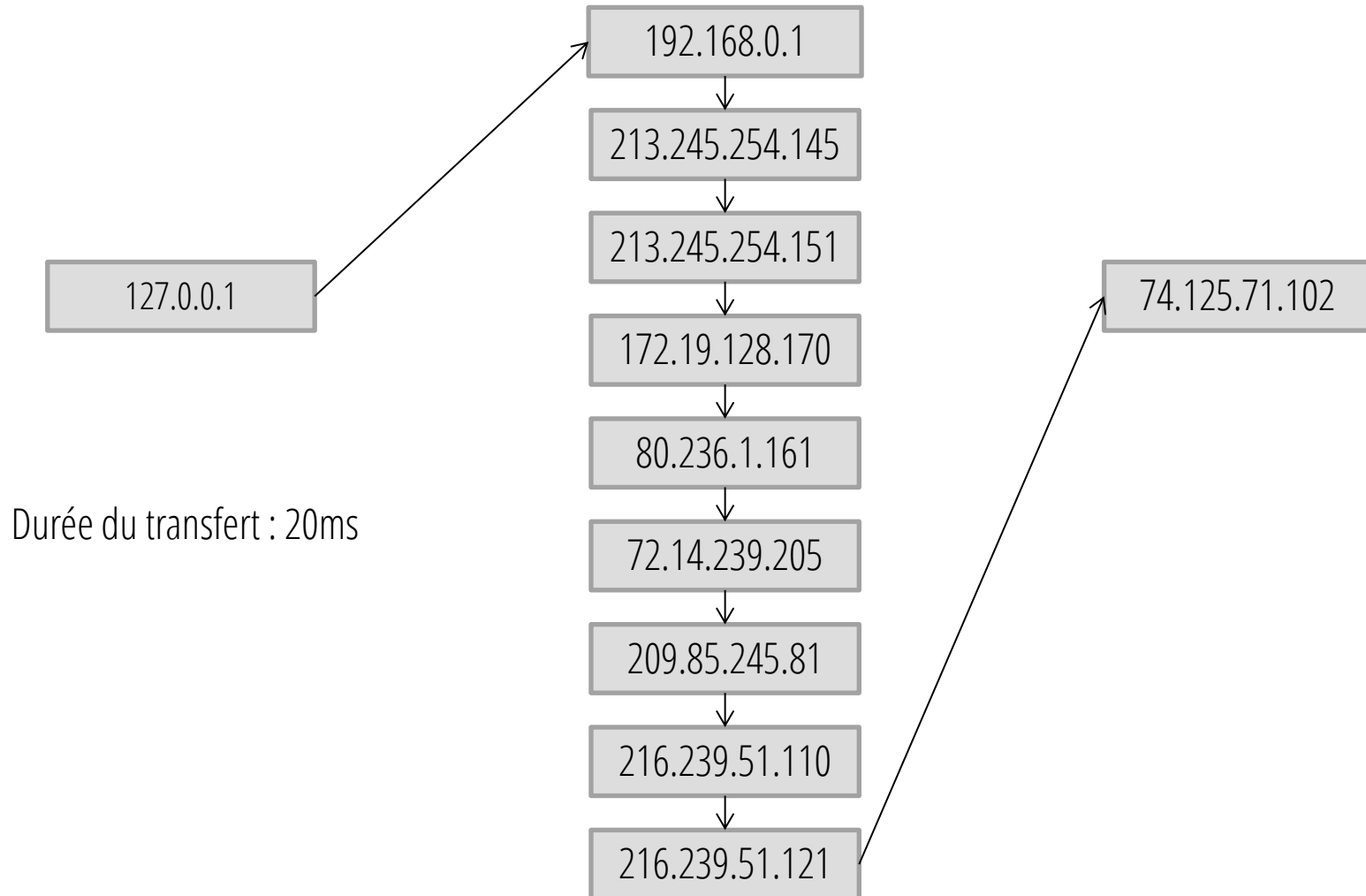
Que se passe-t-il lorsqu'on charge une page sur le web ? Par exemple, www.google.com ?



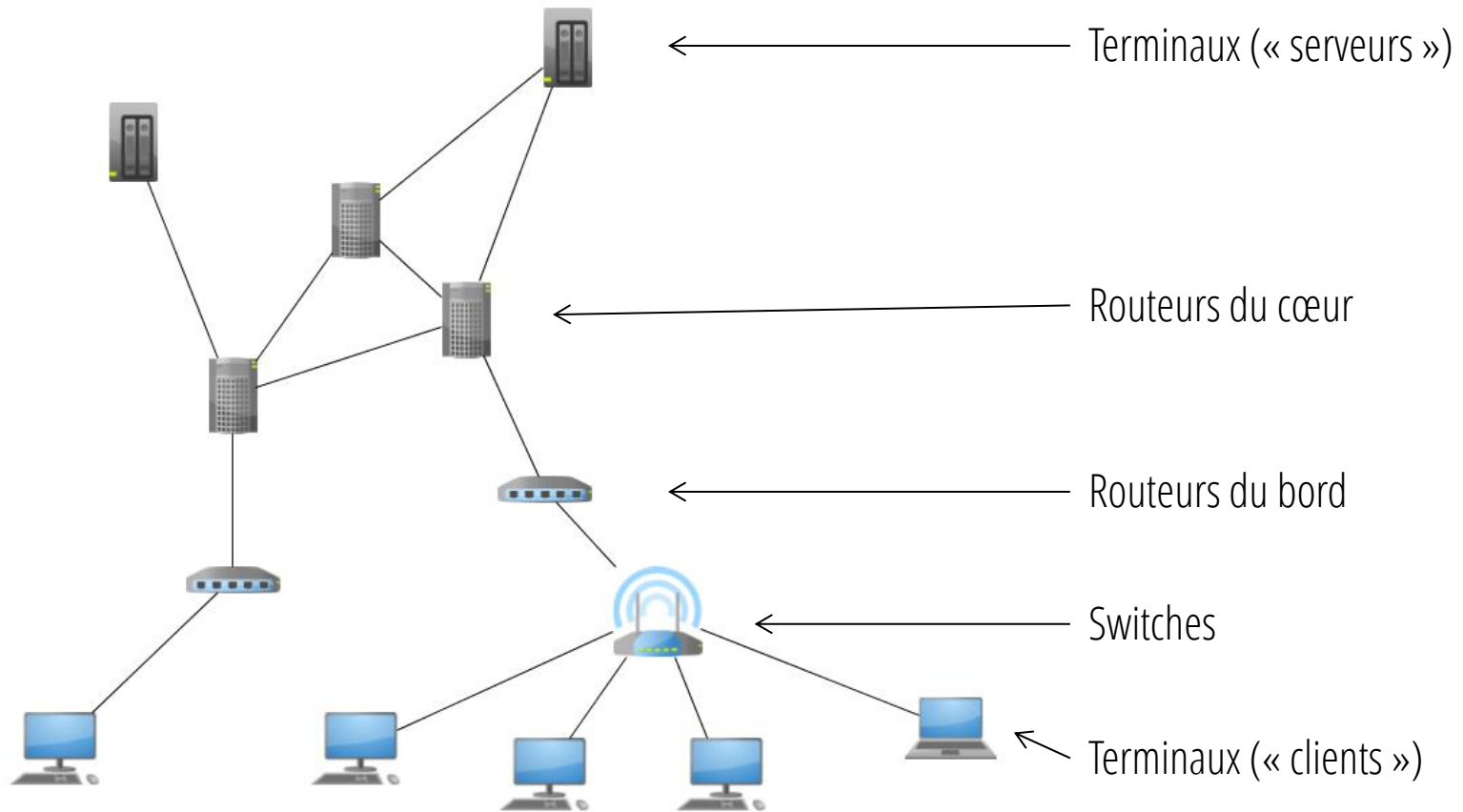
Durée du transfert : 20ms

Transport d'information sur Internet

Que se passe-t-il lorsqu'on charge une page sur le web ? Par exemple, www.google.com ?



Topologie d'Internet



Internet : une boîte noire ?

- Construction extraordinairement complexe
- Histoire longue et décentralisée
- Structure « bottom-up » plutôt que « top-down »
- Pas de carte complète

Milliards d'ordinateurs sur la terre entière

Plus de 40 ans sans gouvernance centrale

N'importe qui peut brancher un terminal

Seulement des fragments parcellaires

Le réseau *fonctionne*, il n'a pas (trop) de pannes, mais ses propriétés précises sont discutées :

- **Diamètre** du réseau (longueur des routes)
- **Plus courts chemins** (routes optimales)
- **Vulnérabilité** aux attaques ciblées
- Résilience aux **pannes**

Des enjeux majeurs

Enjeux industriels

- Toute l'économie numérique repose sur l'intégrité et la fiabilité d'Internet
- Presque toutes les industries utilisent Internet à un niveau ou à un autre
- La mission d'Internet est d'être **le** réseau de télécommunication

Internet est un réseau stratégique pour pratiquement toute activité industrielle en 2015, au moins dans les pays fortement développés.

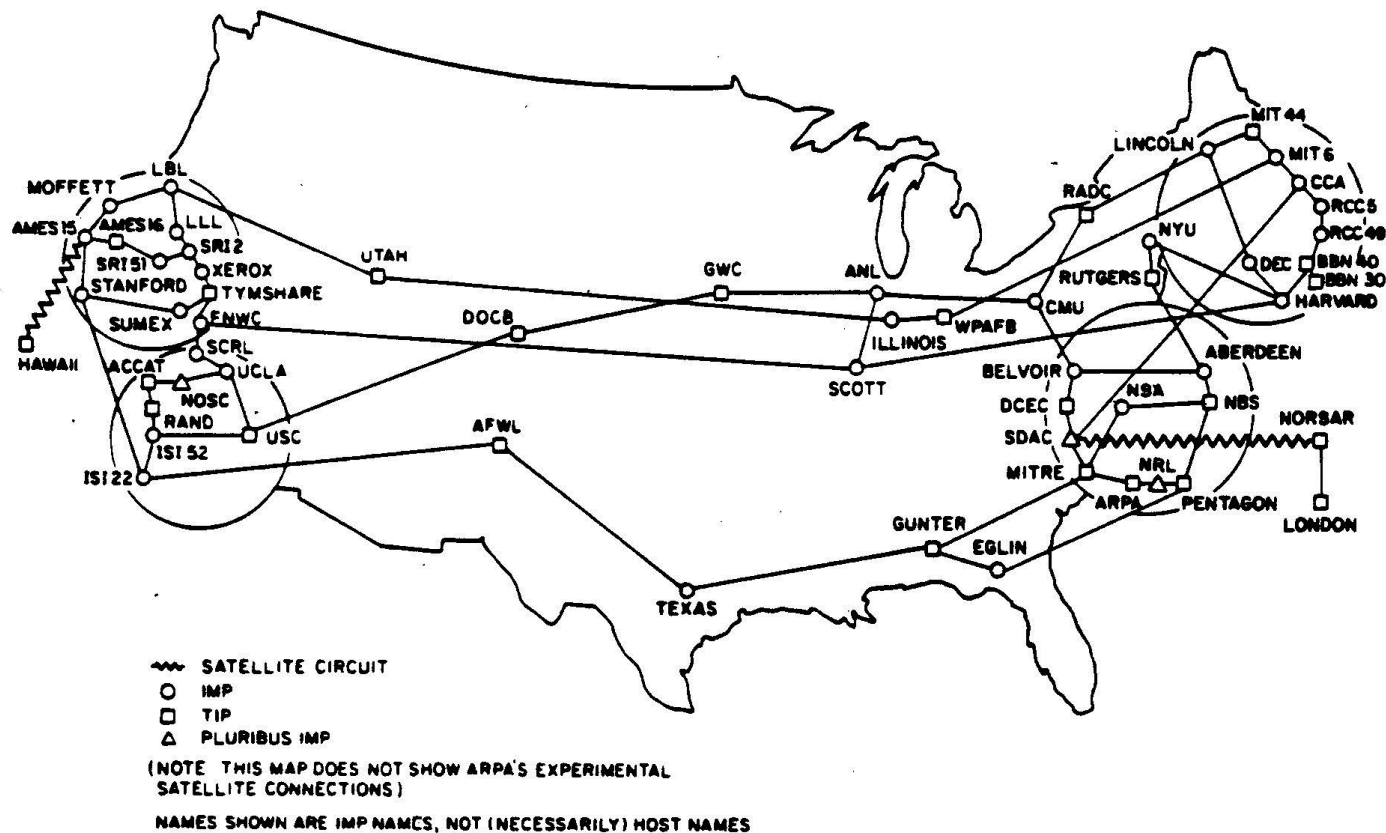
Enjeux théoriques

- Théorie des graphes
- Métrologie des réseaux complexes
- Emergence et systèmes complexes

Internet est l'un des objets fondamentaux de plusieurs théories, particulièrement de théories au cœur des approches interdisciplinaires.

Approches historiques

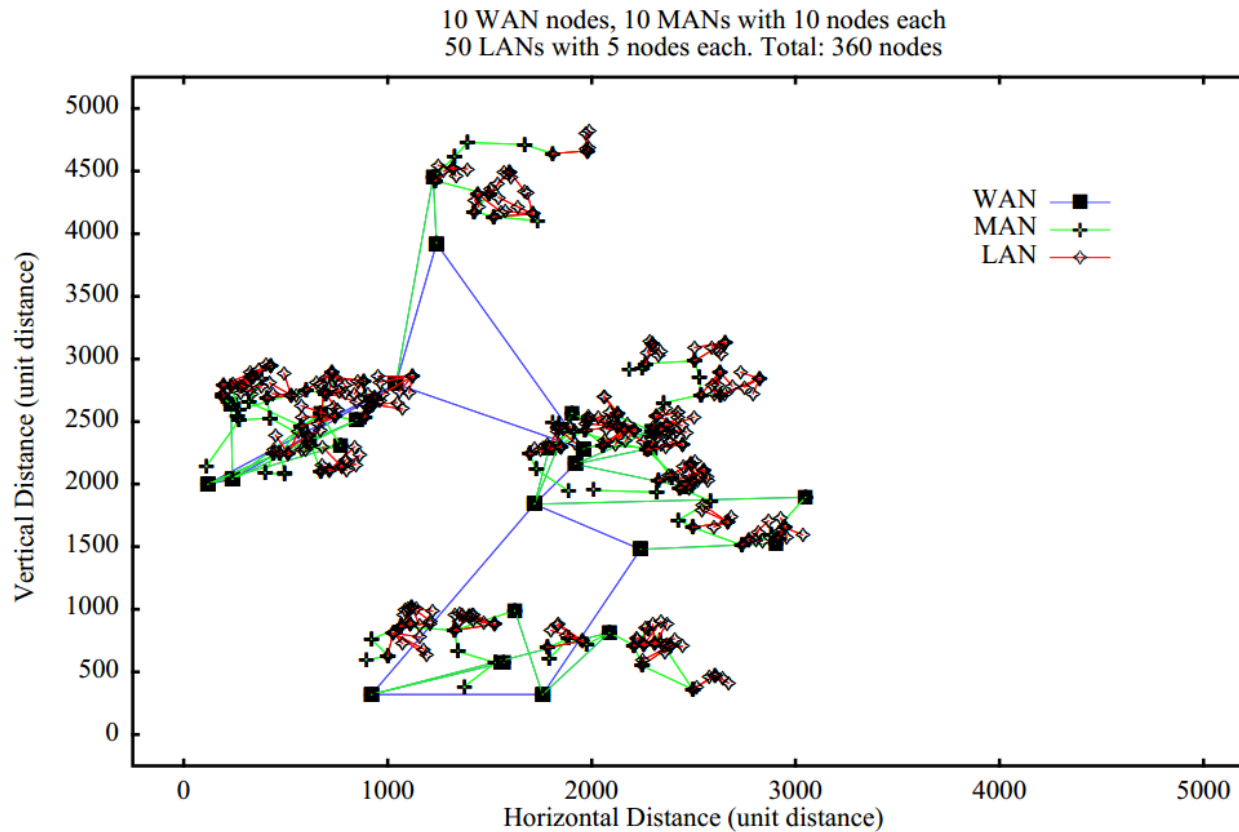
1) Cartes basées sur les déclarations des autorités administratives



Carte du réseau ARPANET, *BNN Technologies*, 1977

Approches historiques

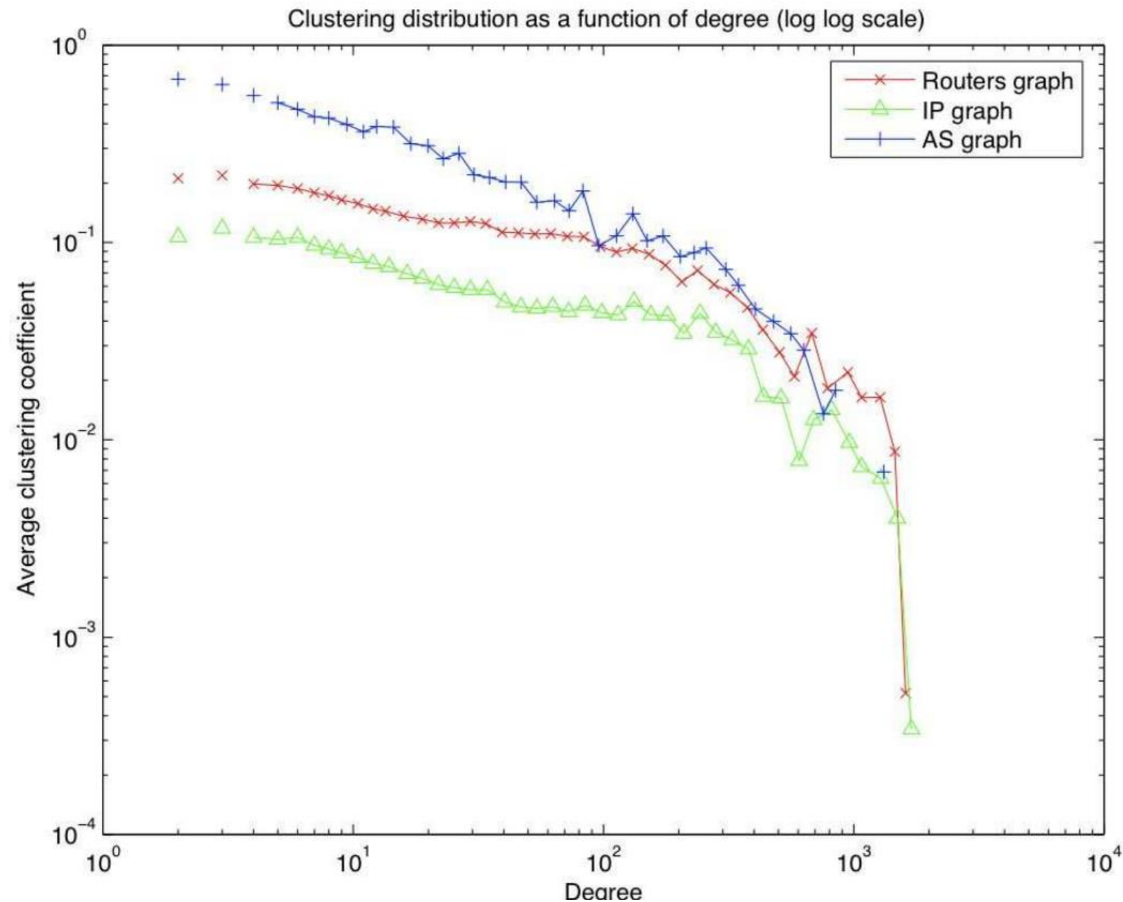
2) Graphes générés à partir d'une connaissance *a priori* des éléments du réseau



Réseau généré par simulation, Doar *et al.*, 1996

Approches historiques

3) Cartes déduites de mesures avec des outils de diagnostic (*traceroute*, *tracetree*...)



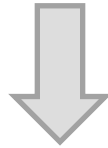
Propriété extraite d'une carte *traceroute*, DIMES, Shavitt *et al.*, 1999

Limites des approches historiques

- Problèmes techniques
 - Passage à l'échelle
 - Erreurs d'interprétation
 - Biais intrinsèque
-
- Encore beaucoup de controverses
 - Propriétés topologiques fondamentales toujours mal connues

Notre approche

- Description formelle de nos objets et de nos outils
- Mesures précises d'observables topologiques
- Echantillonnage rigoureux du réseau
- Méthode d'inférence validée



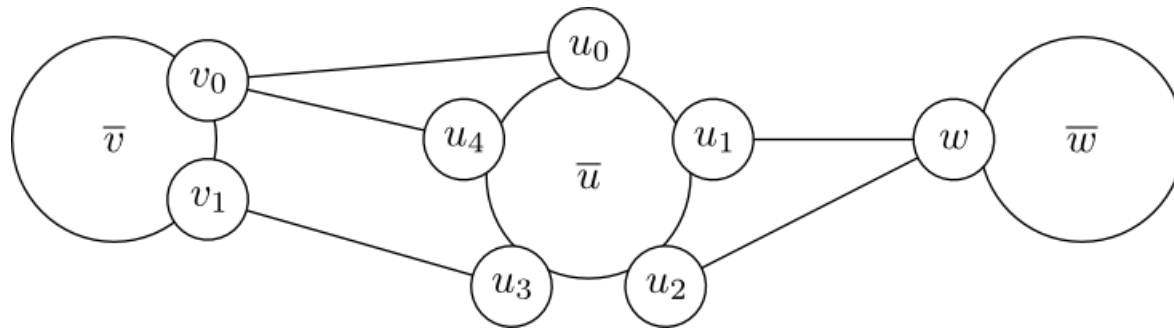
Estimation fiable d'une propriété topologique du réseau

Distribution de degrés au niveau logique

Topologie logique : motivation

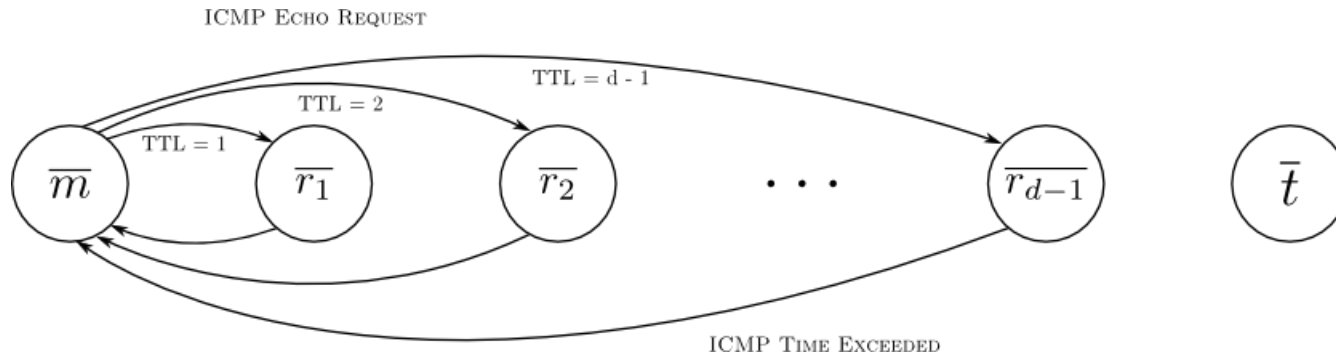
- Correspond à l'intuition usuelle (« hôtes connectés »)
- Importance historique
- Niveau d'opération par défaut de *ping*, *traceroute*...
- Première tentative de mettre en place notre approche

Description formelle des objets



- Hôtes
- Interfaces
- Topologie logique « L2 » (nœuds, aretes)

Description formelle des outils

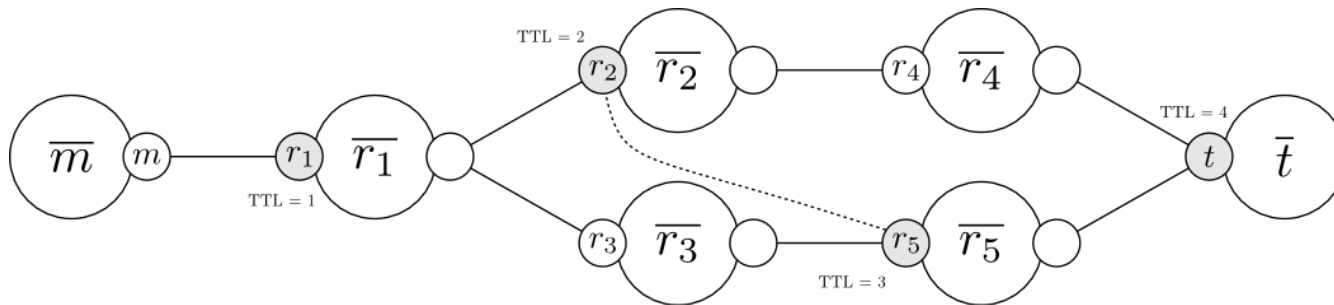


traceroute envoie des sondes avec une durée de vie croissante depuis un moniteur m vers une cible t .

Interprétation classique :

« Les sondes empruntent le chemin $m, r_1, r_2, \dots, r_{d-1}, t$. »

Description formelle des outils

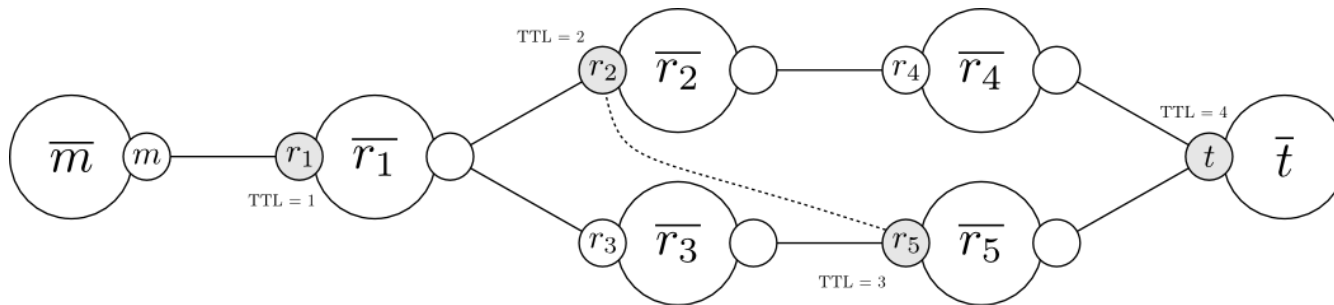


traceroute envoie des sondes avec une durée de vie croissante depuis un moniteur m vers une cible t .

Interprétation classique :

« Les sondes empruntent le chemin $m, r_1, r_2, \dots, r_{d-1}, t.$ »

Description formelle des outils



traceroute envoie des sondes avec une durée de vie croissante depuis un moniteur m vers une cible t .

Notre interprétation (restreinte) :

« r_{d-1} est un voisin de t . »

Primitive de mesure

traceroute depuis 1 moniteur vers une cible —————> 1 voisin de la cible

Primitive de mesure

traceroute depuis 1 moniteur vers une cible —————> 1 voisin de la cible

traceroute depuis N moniteurs vers une cible —————> N voisins de la cible ?

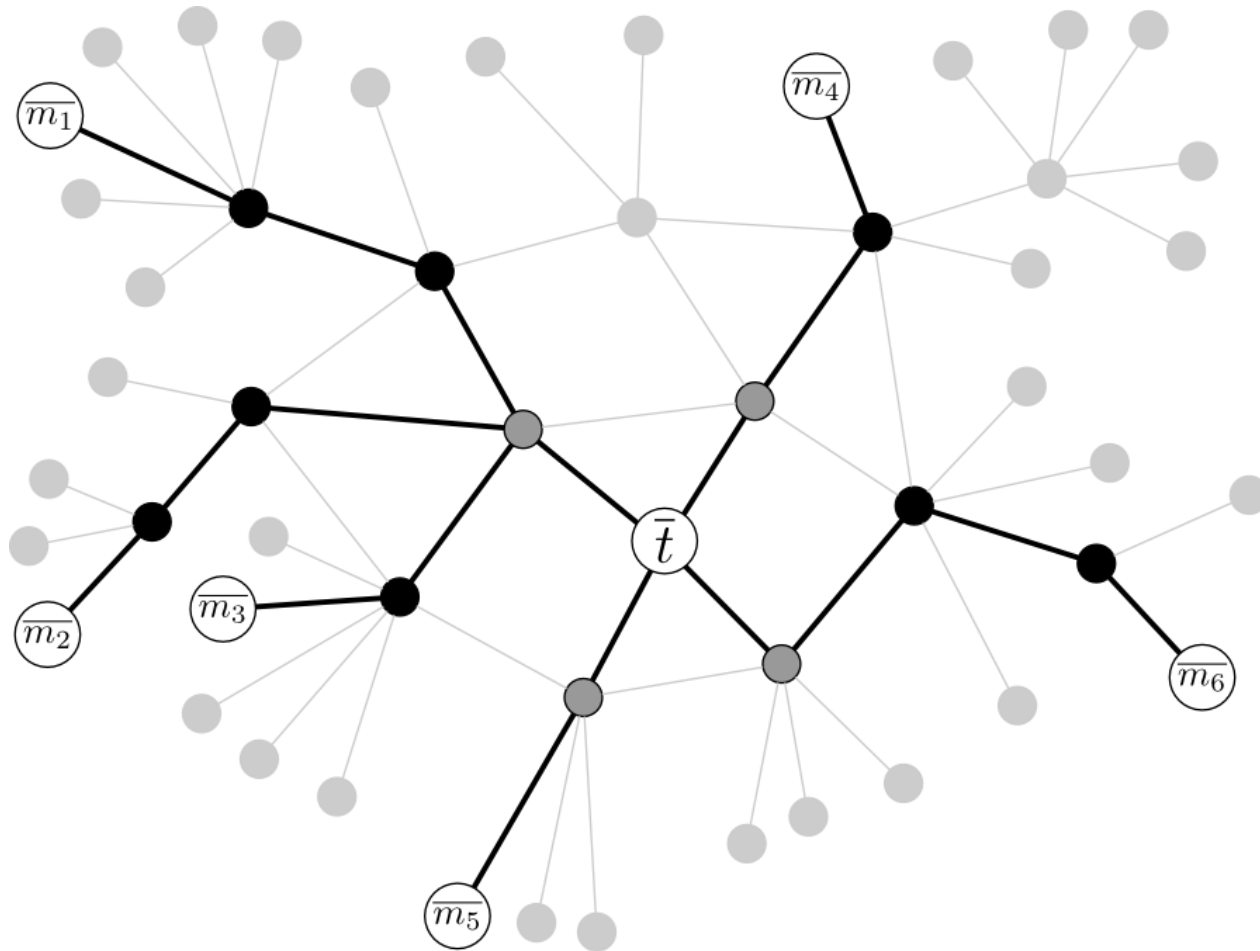
Primitive de mesure

traceroute depuis 1 moniteur vers une cible —————> 1 voisin de la cible

~~*traceroute* depuis N moniteurs vers une cible —————> N voisins de la cible ?~~

traceroute depuis *assez* de moniteurs vers une cible —————> *tous* les voisins de la cible

Primitive de mesure



traceroute depuis *assez* de moniteurs vers une cible \longrightarrow *tous* les voisins de la cible

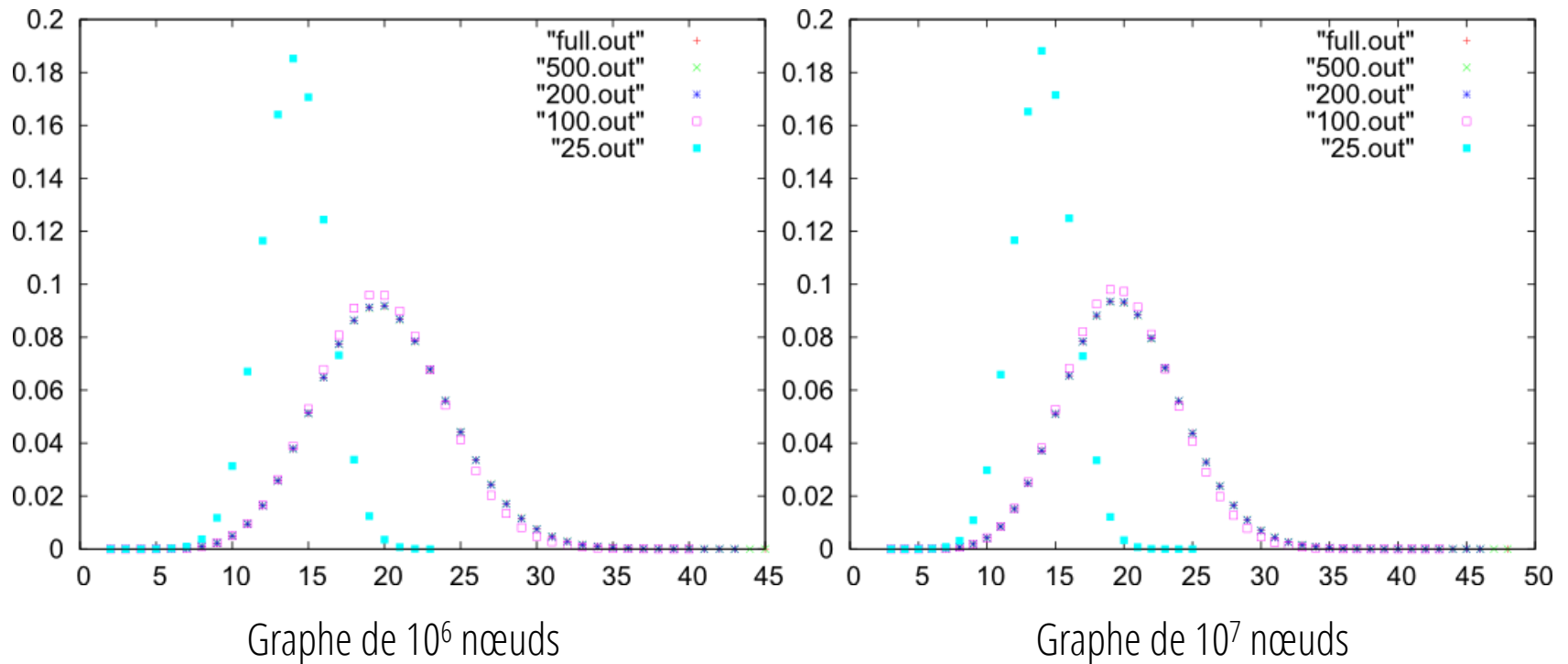
Estimation de la distribution de degrés

- 1) Obtenir un ensemble de moniteurs suffisamment grand
- 2) Tirer un échantillon uniforme et suffisamment grand de cibles
- 3) Effectuer *traceroute* depuis chaque moniteur vers chaque cible
- 4) (Corriger les artefacts de mesure)
- 5) Calculer le degré de chaque cible
- 6) Dédire la distribution de degrés.

Validation de la méthode

- 1) Générer des graphes aléatoires selon des modèles usuels
- 2) Tirer un grand nombre de nœuds, les *moniteurs*
- 3) Considérer que *tous les nœuds* sont des cibles
- 4) Simuler *traceroute* par des plus courts chemins
- 5) Calculer le degré de chaque cible
- 6) Comparer les distributions de degrés mesurée et réelle

Validation de la méthode

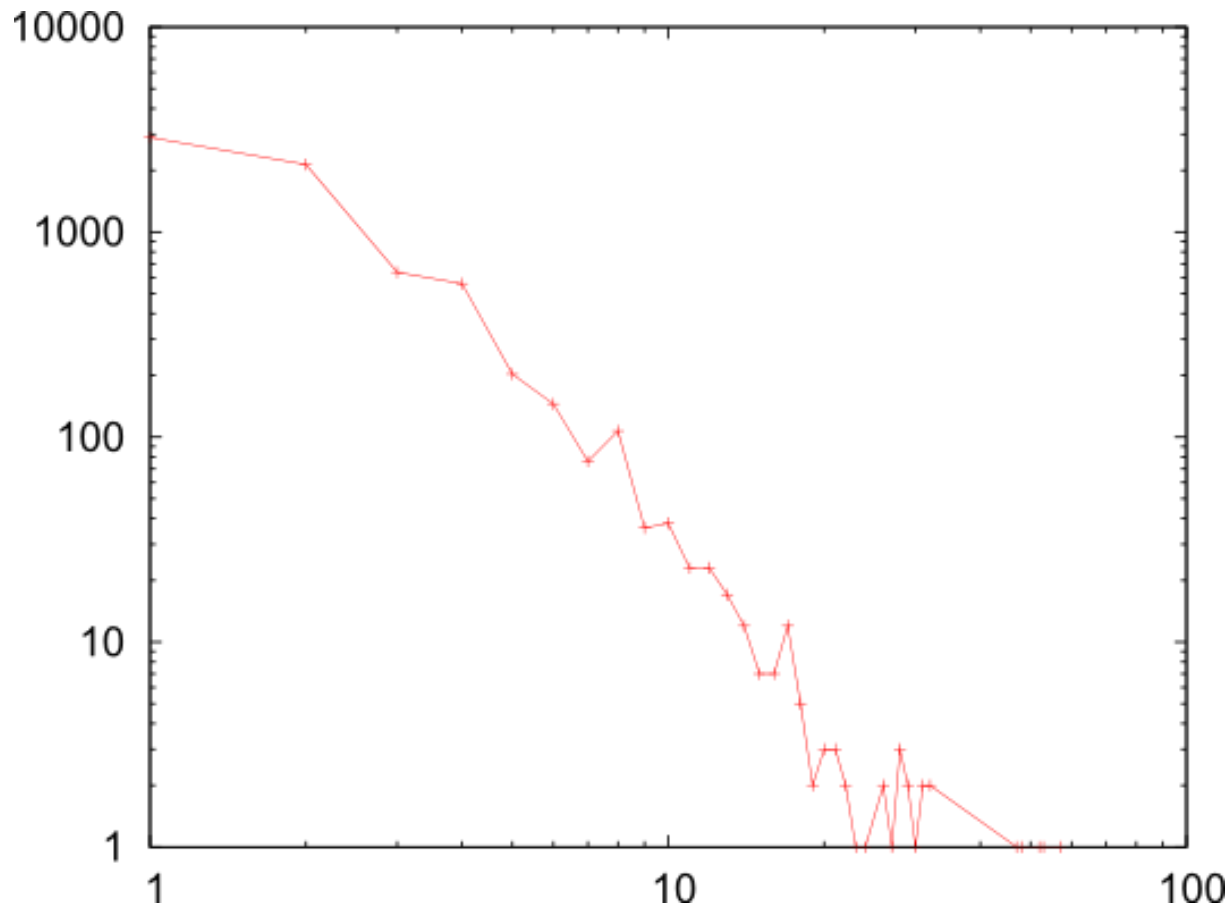


Distribution de degré mesurée et réelle

x : nombre de voisins

y : nombre de cibles

Mesure réelle sur PlanetLab



x : nombre de voisins logiques observés

y : nombre de cibles

Limites de l'approche

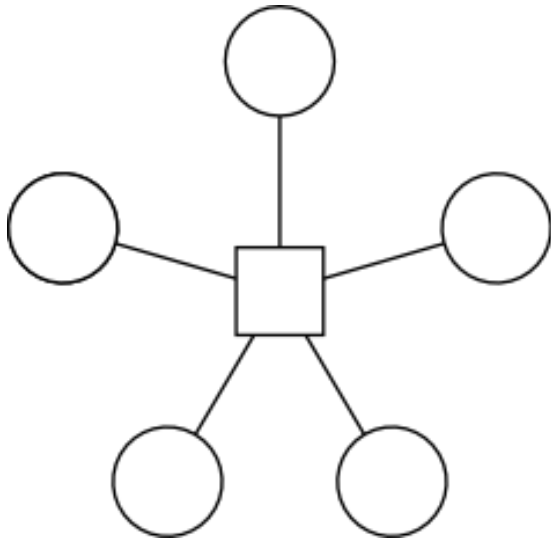
- Sensible aux filtrages ICMP
- Sensible à l'*aliasing*
- Non-uniformité des cibles (par rapport à ces limites)
- Routes de tailles variables et faux voisins
- Qu'a-t-on réellement mesuré ?

Distribution de degrés au niveau physique

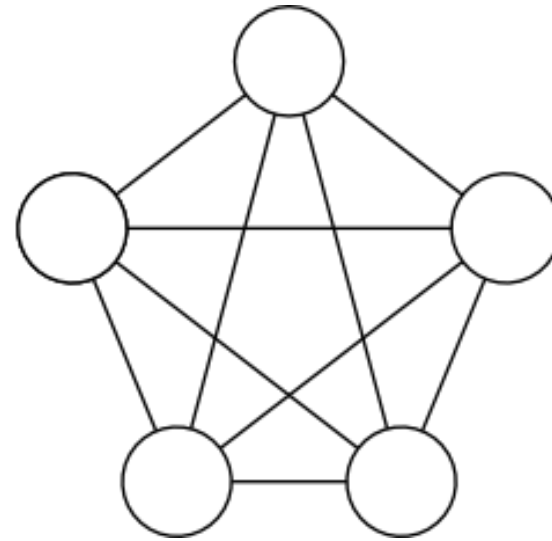
Topologie physique : motivation

- Plus proche de la réalité matérielle (« machines et câbles »)
- Sous-jacente à la topologie logique
- Pertinence mise en évidence par nos travaux préliminaires
- Opportunité d'approfondir notre approche

Description formelle des objets



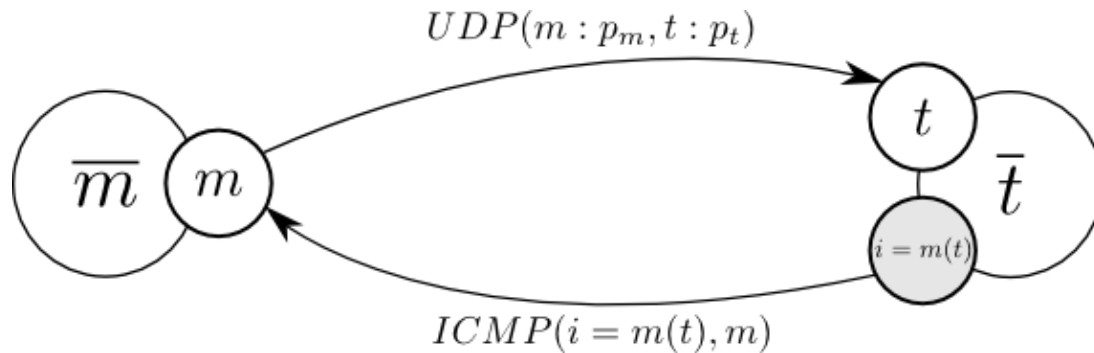
Topologie L3



Topologie L2 induite

- Hôtes
- Interfaces
- Topologie physique « L2/L3 »
- Liens dans L2 \neq liens dans L3

Description formelle des outils

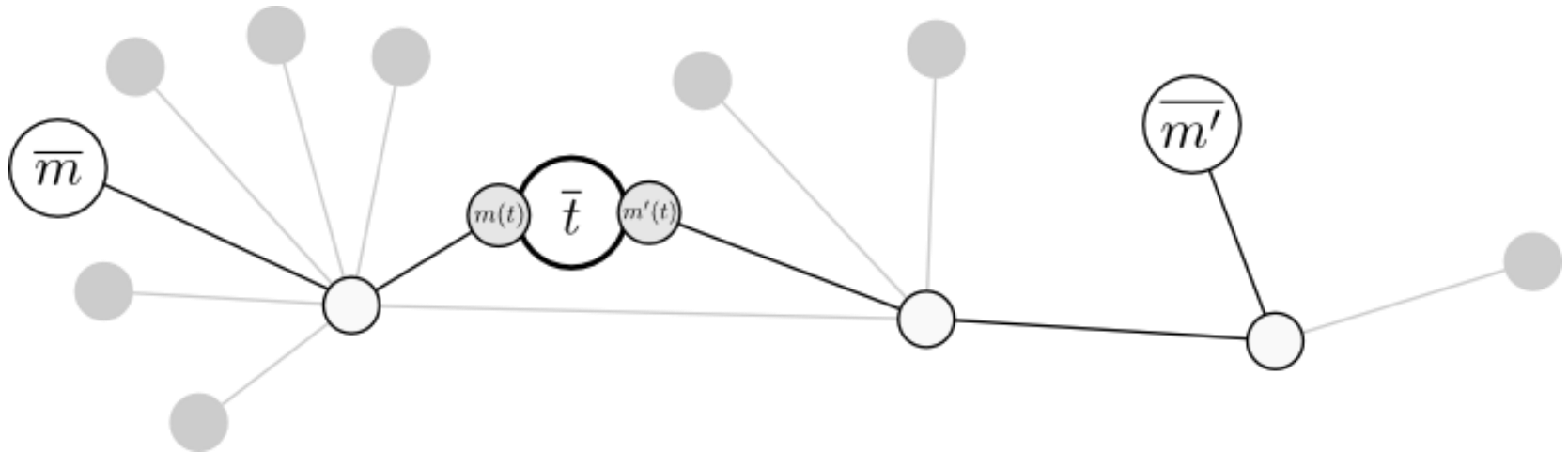


UDP Ping envoie des sondes malformées vers une cible t qui répond un message d'erreur.

Interprétation :

« L'interface de réponse $i = m(t)$ appartient à t . »

Description formelle des outils

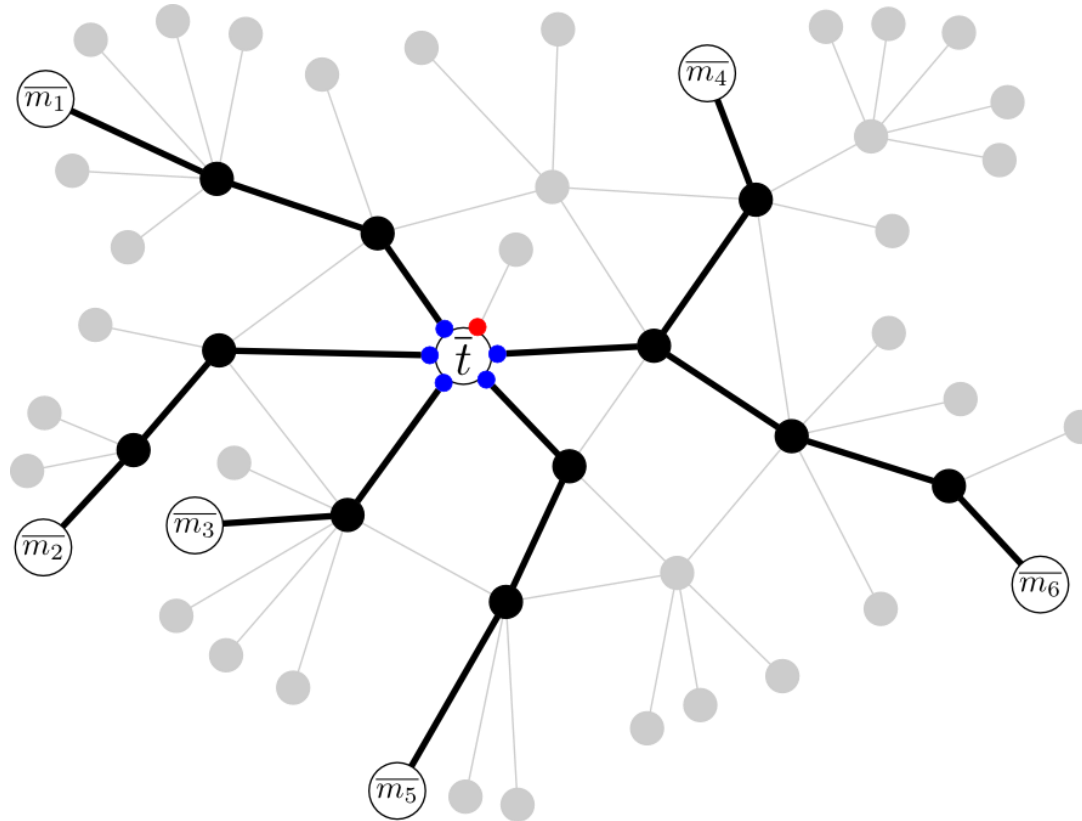


Interprétation :

« L'interface de réponse $i = m(t)$ appartient à t
et cette interface dépend de m . »

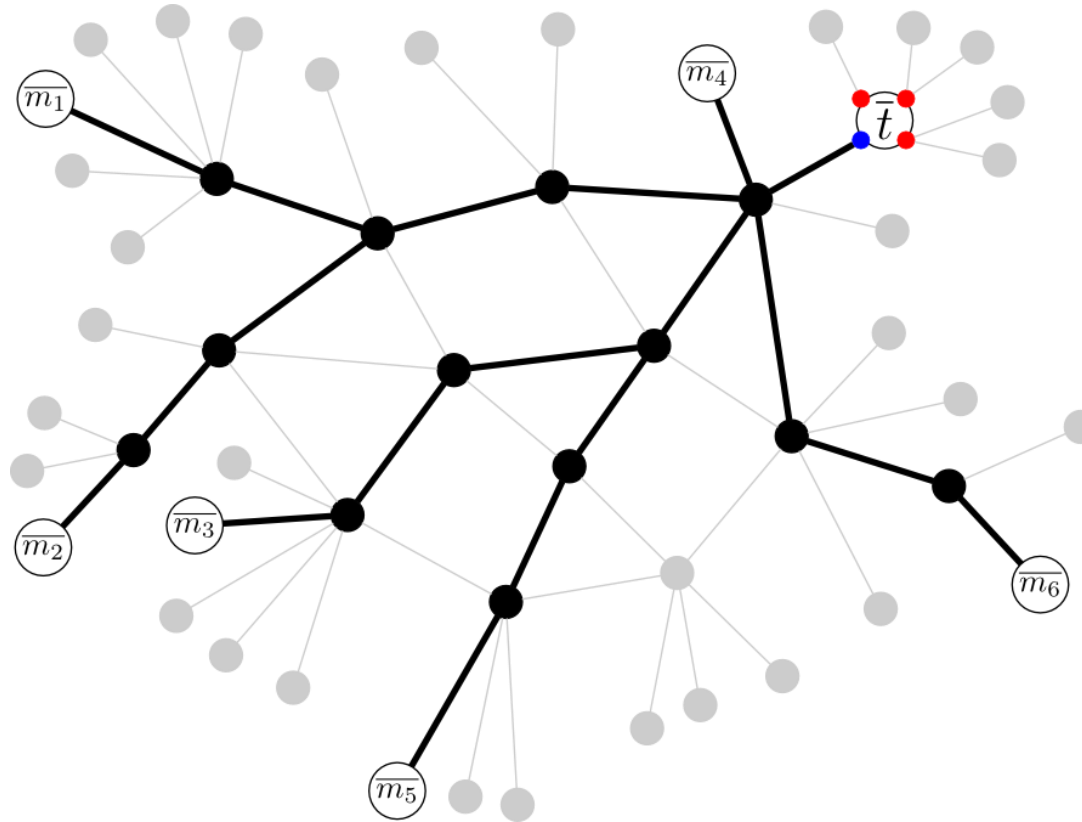
Avec assez de moniteurs, peut-on obtenir *toutes* les interfaces d'une cible ?

Cas d'une cible dans le cœur



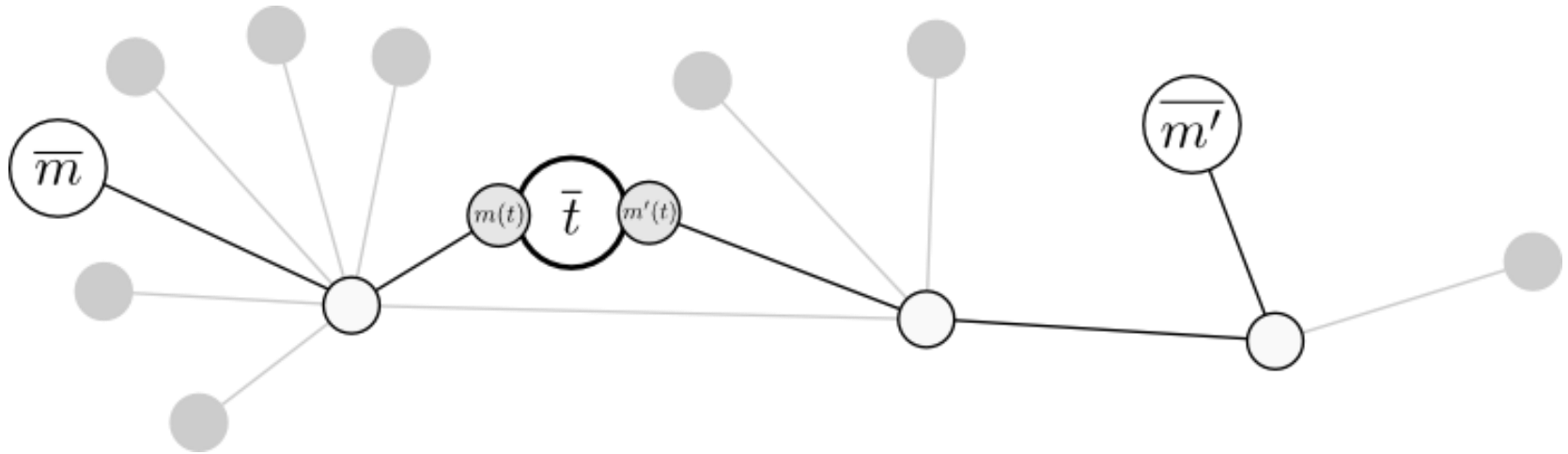
En bleu, les interfaces tournées vers le cœur, sont toutes observées.
En route, les interfaces tournées vers le bord, ne sont pas observées.

Cas d'une cible dans le bord



En bleu, l'unique interface tournée vers le cœur, est observée.
En rouge, les interfaces tournées vers le bord, ne sont pas observées.

Description formelle des outils



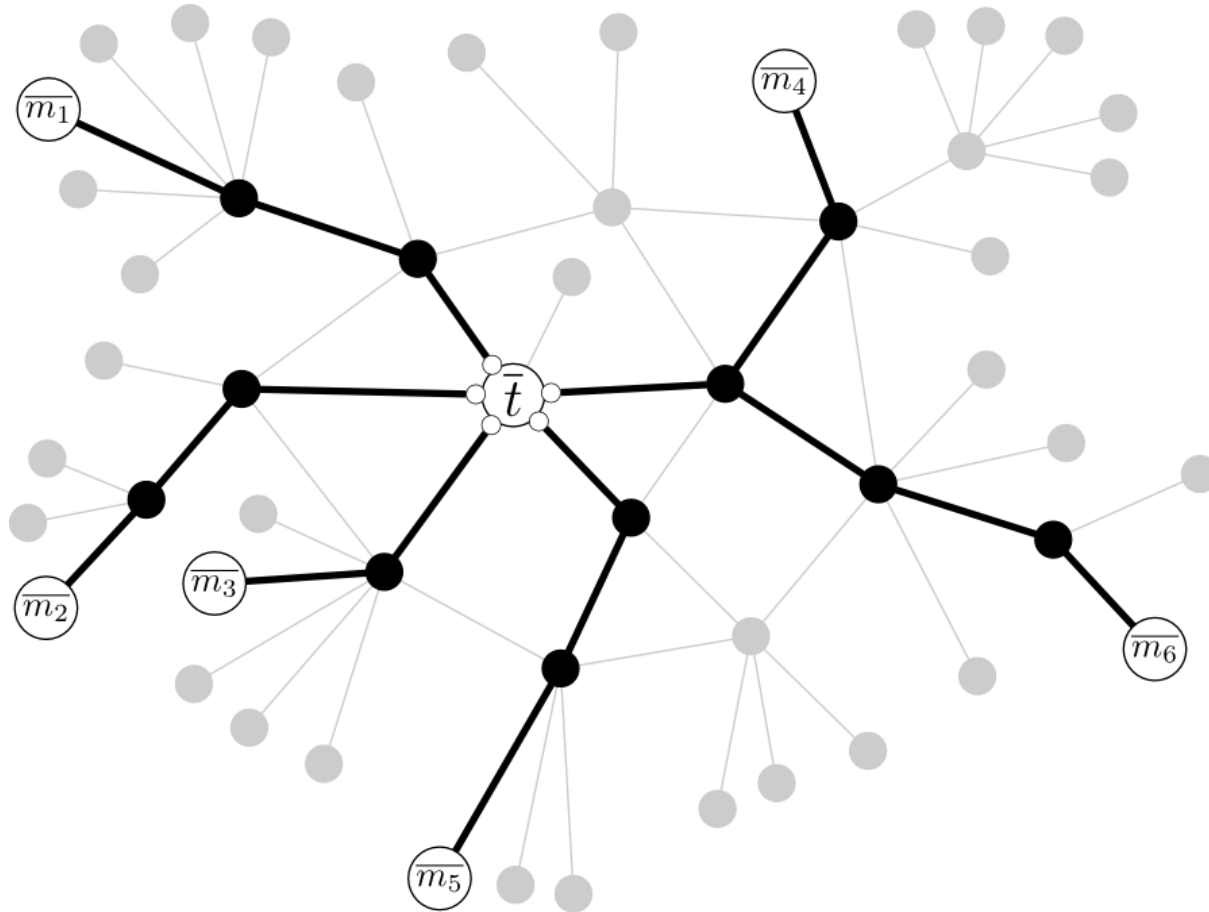
Interprétation :

« L'interface de réponse $i = m(t)$ appartient à t
et cette interface dépend de m . »

Avec assez de moniteurs, peut-on obtenir *toutes les interfaces d'une cible* ?

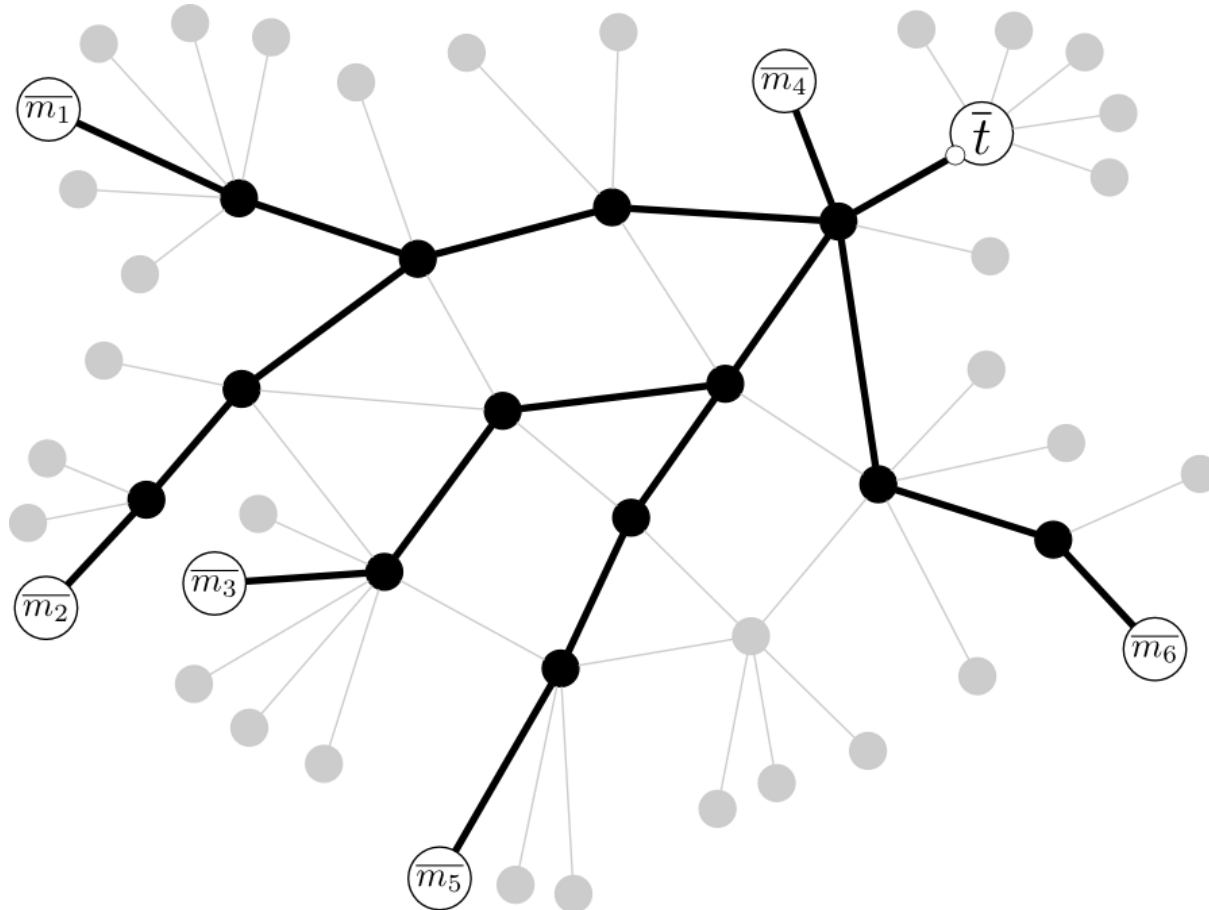
✓ Toutes les interfaces dans le cœur d'une cible dans le cœur.

Caractérisation des cibles dans le cœur



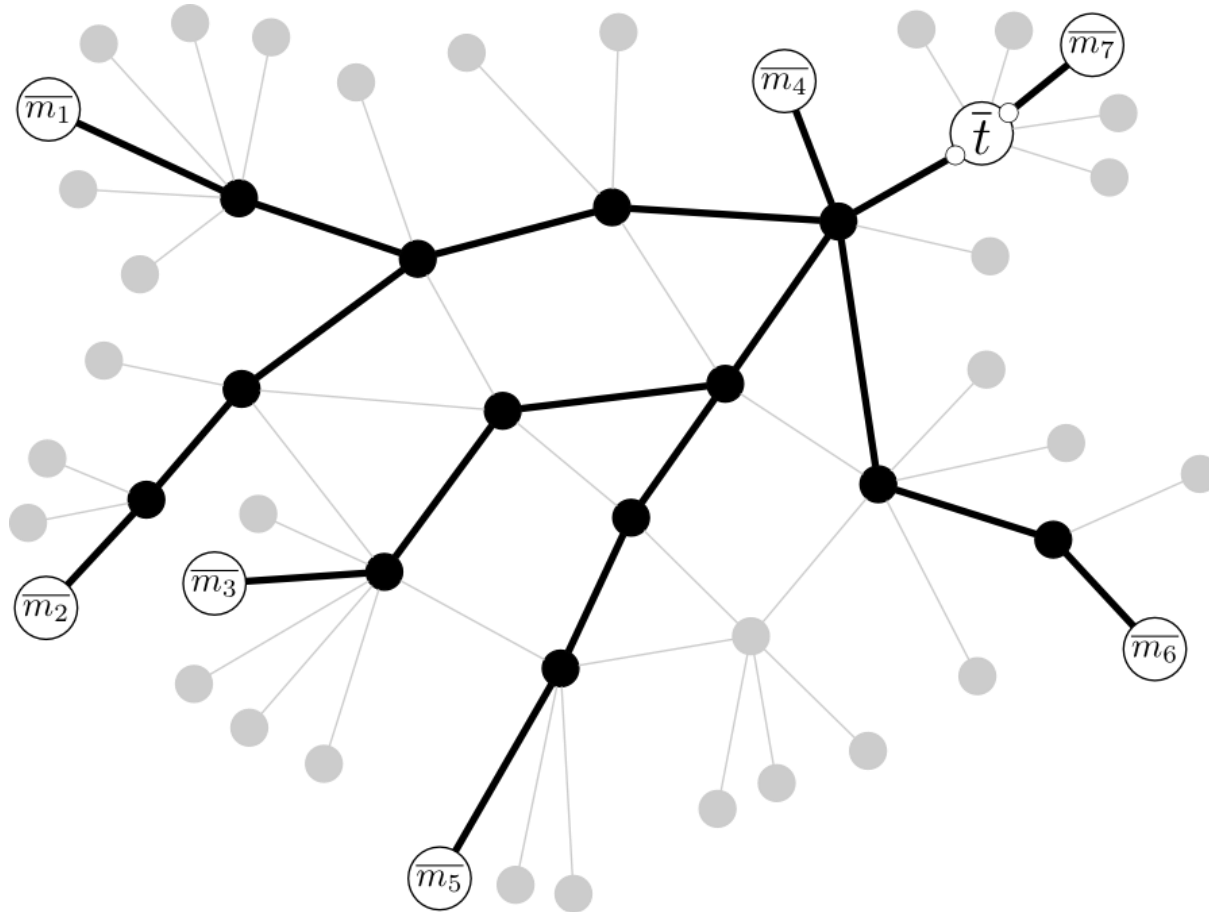
La cible t est dans le cœur : on observe au moins deux interfaces tournées vers le cœur.

Caractérisation des cibles dans le cœur



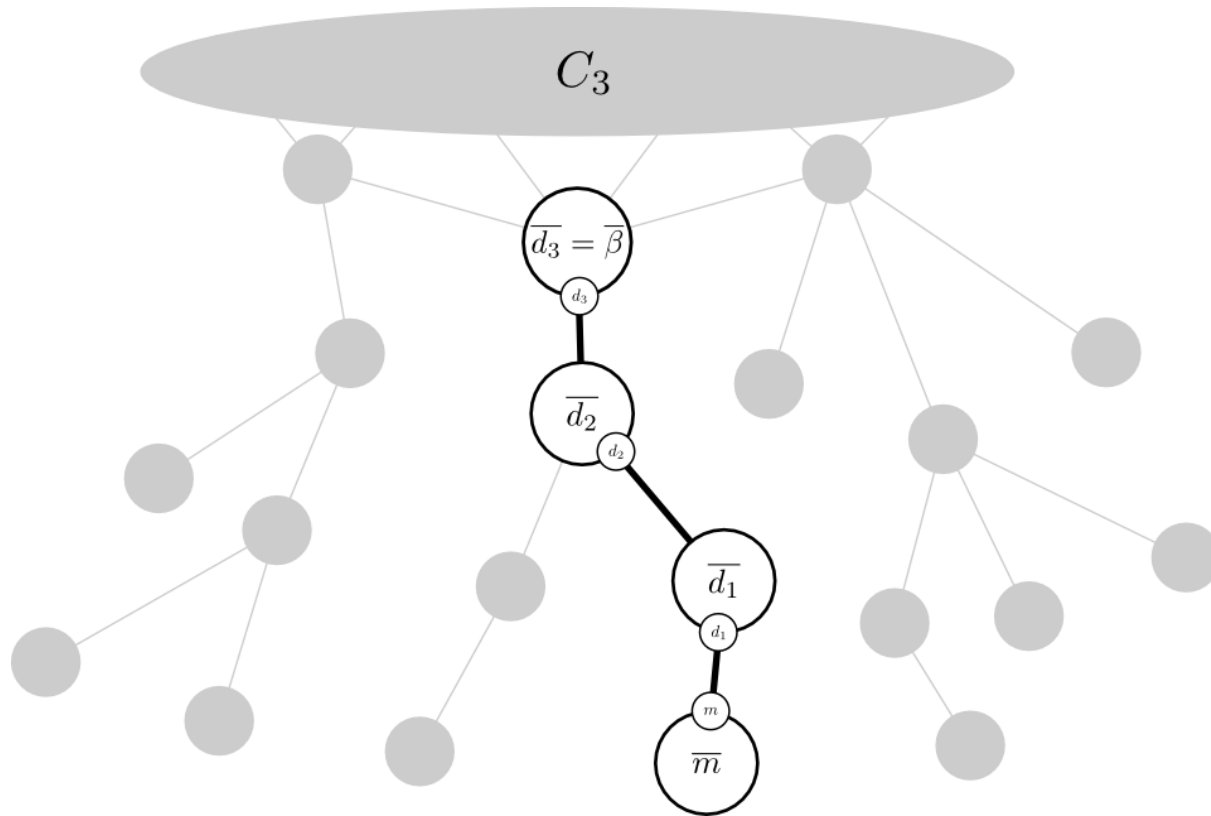
La cible t est dans le bord : on observe une unique interface tournée vers le cœur.

Caractérisation des cibles dans le cœur



Cas problématique : un moniteur est situé « derrière » une cible et deux interfaces sont observées.

Caractérisation des cibles problématiques



UDP Explore donne la liste des interfaces dans le bord observables par *UDP Ping* depuis un moniteur.

Echantillonnage d'adresses de routeurs du cœur

- 1) Effectuer un tirage aléatoire uniforme d'entiers de 32 bits
- 2) Supprimer les entiers ne correspondant pas à des adresses valides (RFC)
- 3) Exécuter UDP Explore depuis chaque moniteur
- 4) Exécuter UDP Ping depuis chaque moniteur vers chacune des adresses valides
- 5) Supprimer les interfaces observées par UDP Explore des résultats
- 6) Supprimer les cibles ayant moins de 2 interfaces dans le cœur

Correction du biais de sélection

Echantillonner des **adresses** \neq échantillonner des **routeurs**

- Sélection uniforme sur les adresses
 - Probabilité de tirage d'un routeur = proportionnelle à son nombre d'adresses
- Transformation de correction du biais :

$$p_k = \frac{p'_k}{k} \cdot \frac{1}{\sum_i \frac{p'_i}{i}}$$

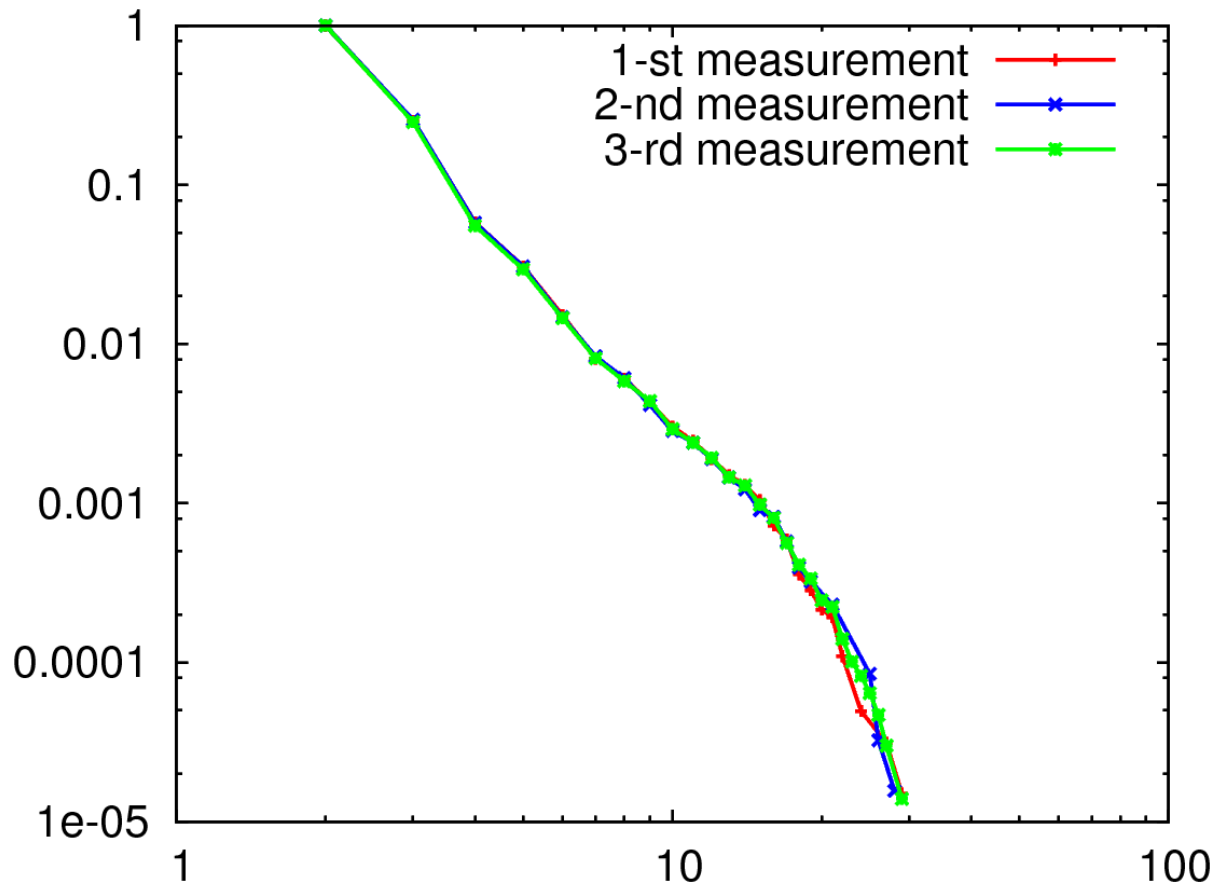
Validation de la méthode

- 1) Générer des graphes aléatoires selon des modèles usuels
- 2) Tirer un grand nombre de nœuds, les *moniteurs*
- 3) Considérer que *tous les nœuds* sont des cibles
- 4) Simuler *UDP Ping* par des plus courts chemins
- 5) Calculer le degré de chaque cible
- 6) Comparer les distributions de degrés mesurée et réelle

Mesure réelle sur PlanetLab

- 700 moniteurs initialement
- $3 \cdot 10^6$ cibles initiales échantillonnées en 10 heures
- Mesure répétée 3 fois, chacune durant 4 heures
- 5600 cibles dans le cœur après filtrage

Mesure réelle sur PlanetLab



x : nombre d'interfaces (degré physique)

γ : fraction des routeurs

Validation des résultats

- Réinjection de la distribution mesurée dans les simulations (bootstrapping)
- Evaluation de la qualité de l'ensemble des moniteurs
 - Classes de colocalisation
 - Convergence des résultats

Limites de l'approche

Tables de transmission

Conclusions et perspectives