

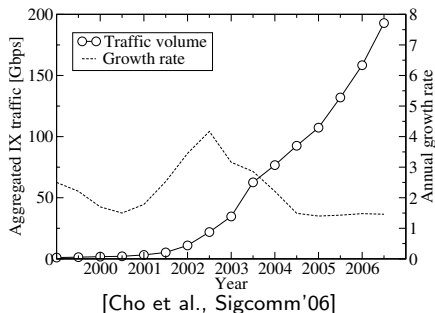
# Analyse du trafic et de la qualité de service dans les réseaux: une approche mixte expériences / théorie

Patrick Loiseau  
École Normale Supérieure de Lyon

Thèse effectuée au laboratoire de l'informatique du parallélisme  
dans l'équipe INRIA RESO  
sous la direction de Paulo Gonçalves et Pascale Vicat-Blanc Primet

11 Décembre 2009

# Contexte



- Le réseau Internet est en expansion continue (nombre d'abonnés, tailles des fichiers transférés, volume de trafic, etc.)
  - "Qualité de service": **performance**, sécurité, etc.
    - Approche déterministe (exemple: IntServ, Network Calculus)
    - **Approche statistique** (exemple: dimensionnement)
- ⇒ Quelles sont les propriétés statistiques du trafic ?
- ⇒ Quel est leur impact sur la qualité de service ?

## Contexte II: les réseaux évoluent, la théorie aussi

1917 Erlang: réseaux de téléphone  
Markov

1969 Kleinrock: réseaux de paquet  
Markov

1988 Van Jacobson: AIMD - TCP

1992 Tim Berners Lee: Web

1993 Leland Williger Taqqu: LRD WAN

1994 Paxson Floyd: LRD LAN

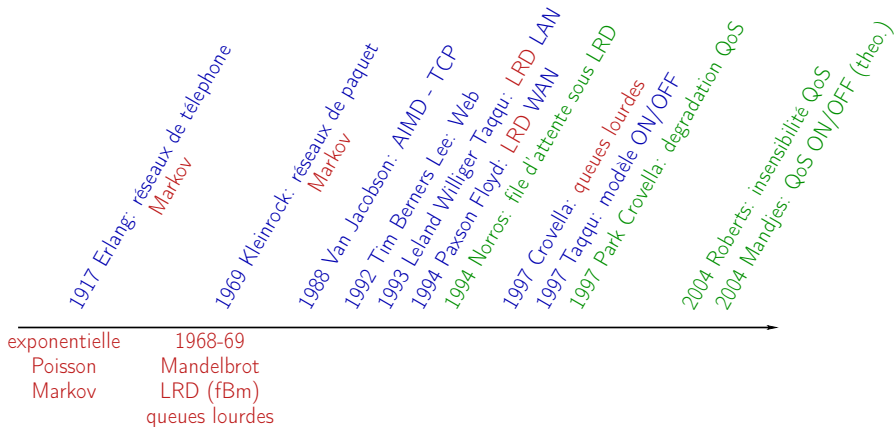
1997 Crovella: queues lourdes

1997 Taqqu: modèle ON/OFF

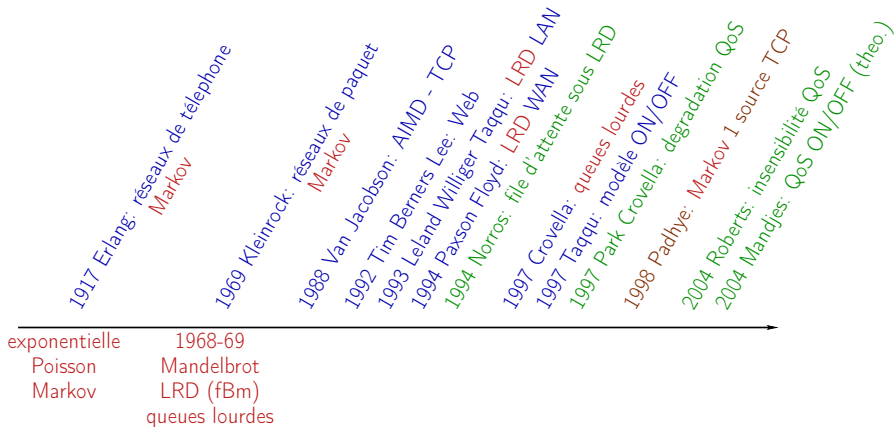
exponentielle  
Poisson  
Markov

1968-69  
Mandelbrot  
LRD (fBm)  
queues lourdes

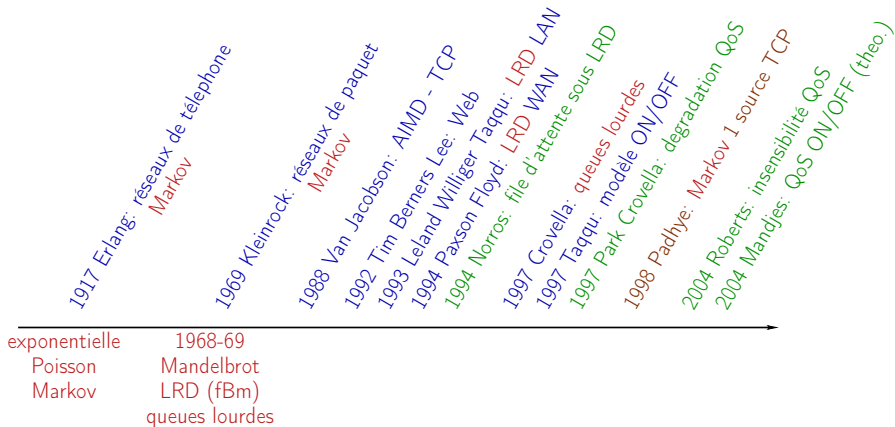
## Contexte II: les réseaux évoluent, la théorie aussi



## Contexte II: les réseaux évoluent, la théorie aussi



## Contexte II: les réseaux évoluent, la théorie aussi



- De nombreuses questions restent ouvertes:
  - impact de la longue mémoire / des queues lourdes sur la QoS ?
  - modèle de Padhye ne donne que le débit moyen: que dire de la variabilité ?

# Comment faire avancer la connaissance sur le trafic ?

- Utilisation de traces réelles
  - Caractéristiques du trafic/comportement des utilisateurs en situation réelle, tendances de l'évolution de ces caractéristiques
  - MAIS résultats contextuels
- Modèles théoriques
  - Conclusions plus générales, compréhension des phénomènes
  - MAIS on ne peut pas tout modéliser (TCP en particulier): approximations, système simplifié
- Simulations (ns2)
  - Compréhension des limites des modèles théoriques, investigation sur un système plus proche de la réalité
  - MAIS le système simulé n'est pas encore le système réel (problèmes de déterminisme, etc.), simulations ns2 longues

# Comment faire avancer la connaissance sur le trafic ?

- **Utilisation de traces réelles**

- Caractéristiques du trafic/comportement des utilisateurs en situation réelle, tendances de l'évolution de ces caractéristiques
- MAIS résultats contextuels

- **Modèles théoriques**

- Conclusions plus générales, compréhension des phénomènes
- MAIS on ne peut pas tout modéliser (TCP en particulier): approximations, système simplifié

- Simulations (ns2) → **Expériences contrôlées**

- Compréhension des limites des modèles théoriques, investigation sur un système plus proche de la réalité
- MAIS le système simulé n'est pas encore le système réel (problèmes de déterminisme, etc.), simulations ns2 longues

⇒ Notre approche: **combinaison** de **modèles théoriques**,  
**d'expériences contrôlées** en environnement réel et de **traces réelles**



# Contributions de la thèse

- Développement d'une plate-forme de métrologie
  - plate-forme expérimentale contrôlée à grande échelle
  - système de capture du trafic
- Étude des propriétés du trafic agrégé à grande échelle
  - étude expérimentale de la relation de Taqqu
  - extension du modèle de Taqqu
  - étude expérimentale de l'impact sur la qualité de service
- Estimation du paramètre de queue lourde sous échantillonnage
- Étude des propriétés multifractales du trafic TCP au niveau paquet
  - théorème de grandes déviations pour les processus mélangeants
  - application à l'évaluation des performances d'une source TCP

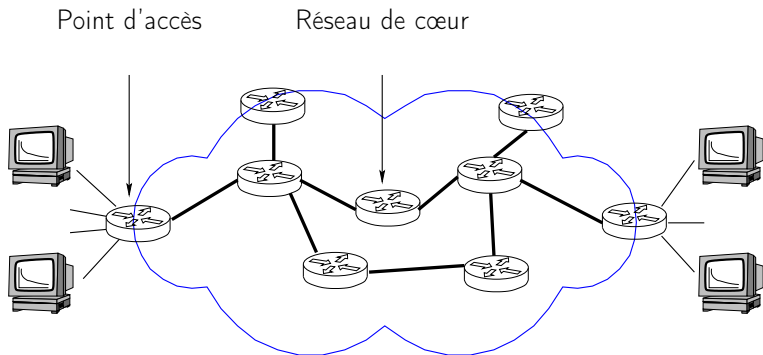
# Plan

- 1 Plate-forme pour les expériences contrôlées
- 2 Trafic agrégé à grande échelle et qualité de service
- 3 Trafic TCP au niveau paquet et performances

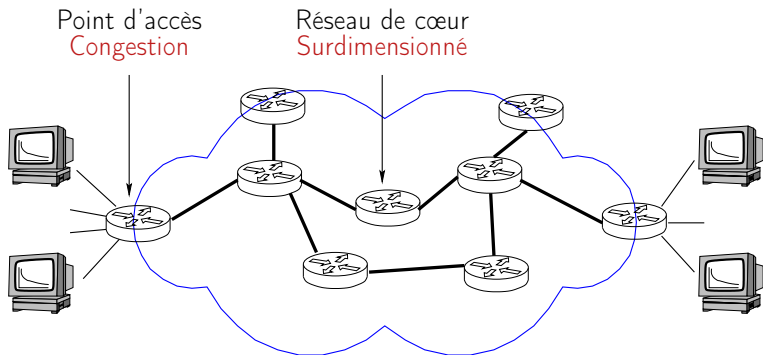
# Plan

- 1 Plate-forme pour les expériences contrôlées
- 2 Trafic agrégé à grande échelle et qualité de service
- 3 Trafic TCP au niveau paquet et performances

# Système simplifié

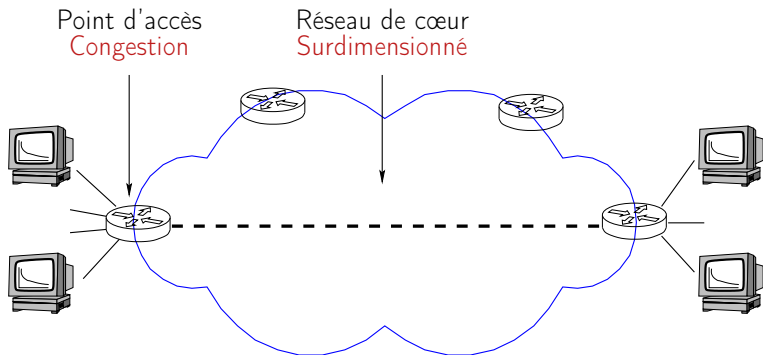


# Système simplifié



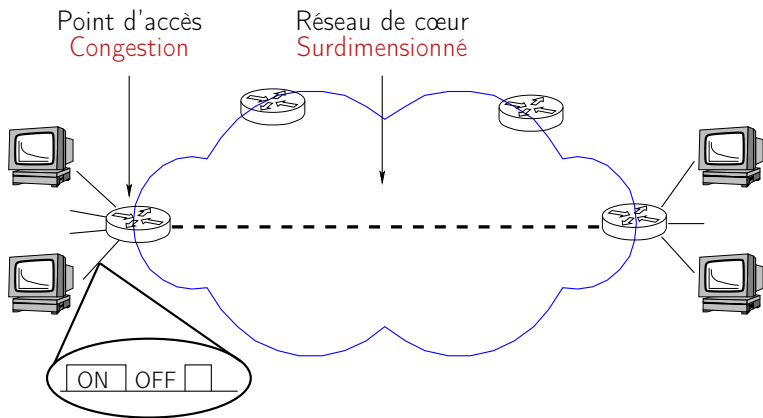
- La congestion intervient majoritairement aux points d'accès

# Système simplifié



- La congestion intervient majoritairement aux points d'accès  
⇒ Système simplifié: bottleneck unique

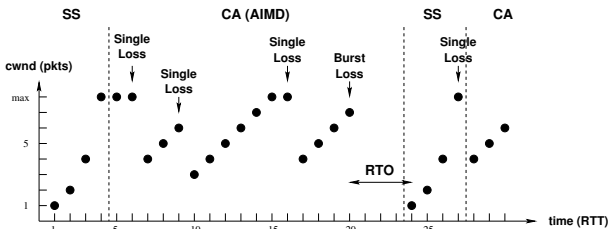
# Système simplifié



- La congestion intervient majoritairement aux points d'accès
- ⇒ Système simplifié: bottleneck unique
- Comportement des utilisateurs: ON/OFF (ON: émission d'un **flot**)

# Le protocole de transport

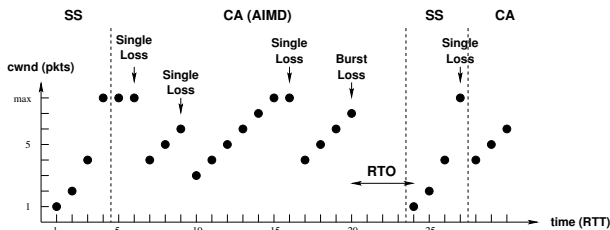
- “UDP parfait”: émission non contrôlée (régulière, débit constant)
- TCP: contrôle de congestion
  - transmission par *bursts* (fenêtre de congestion  $W$ ) à chaque RTT
  - débit variable dû aux mécanismes de contrôle de congestion: AIMD, Slow-Start, Timeout (Reno)
  - des sources en compétition sont corrélées à l'échelle RTT





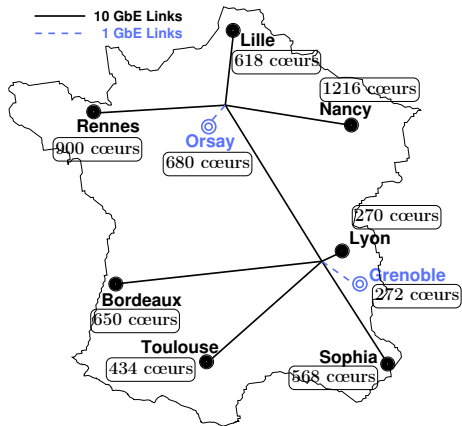
# Le protocole de transport

- “UDP parfait”: émission non contrôlée (régulière, débit constant)
- TCP: contrôle de congestion
  - transmission par *bursts* (fenêtre de congestion  $W$ ) à chaque RTT
  - débit variable dû aux mécanismes de contrôle de congestion: AIMD, Slow-Start, Timeout (Reno)
  - des sources en compétition sont corrélées à l'échelle RTT



- ⇒ Certaines caractéristiques du trafic vont dépendre du protocole
- ⇒ La boucle de contrôle de TCP complique sa modélisation

# Une plate-forme expérimentale contrôlée et à grande échelle

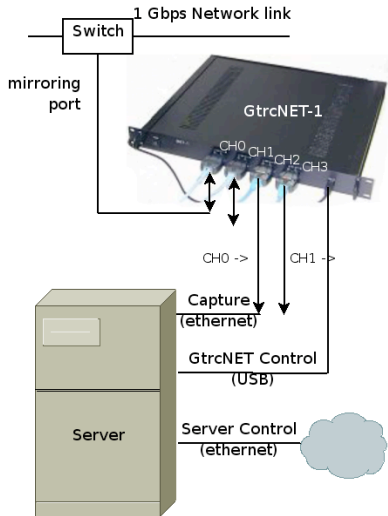


- Grid'5000
- **Grande échelle:**  $\geq 5000$  cœurs sur 9 sites en France (+ connections internationales)
- **Reproductibilité:** réservation de machines choisies (OAR)
- **Flexibilité:** chaque utilisateur déploie son propre environnement (kadeploy)
- **Isolement de l'Internet:** liens dédiés

⇒ Expériences avec un grand nombre de machines réelles à très haut débit

- Automatisation des expériences: *TranSim*

# MetroFlux: système de capture du trafic à l'échelle paquet



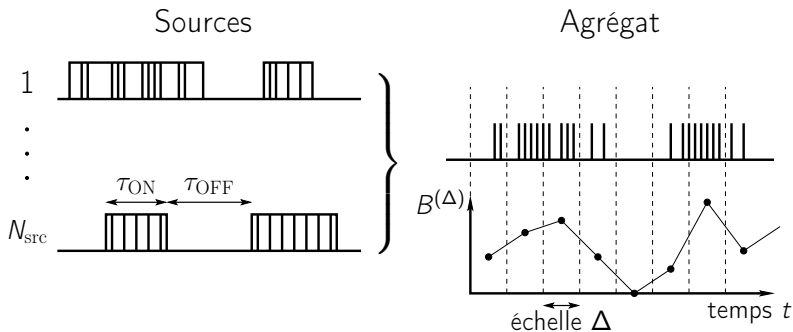
- GtrcNet-1 (1 Gbps), GtrcNet-10 (10 Gbps): FPGA
  - filtres/échantillonnage optionnels
  - extraction des en-têtes
  - timestamp (précision 1  $\mu$ s)
- Serveur de capture:
  - stockage des paquets sans pertes
  - jusqu'à 60 heures à 1 Gbps
- Logiciels ipsumdump/IPTools
  - traitement des traces de paquets
  - filtrage optionnel
  - agrégation, reconstruction des flots, etc.

⇒ À partir de la trace au niveau paquet, on reconstruit toute l'information sur le trafic: débit agrégé, suite de flots, etc.

# Plan

- 1 Plate-forme pour les expériences contrôlées
- 2 Trafic agrégé à grande échelle et qualité de service**
- 3 Trafic TCP au niveau paquet et performances

## Premier niveau de description: trafic agrégé



- Périodes ON et OFF: variables aléatoires i.i.d.
- Agrégation  $\leftrightarrow$  superposition
- Moyennage à l'échelle  $\Delta \leftrightarrow$  comptage
- Bande passante agrégée à l'échelle  $\Delta$ :  $B^{(\Delta)}(t)$  processus stochastique

# Longue mémoire dans le trafic agrégé: modèle de Taqqu

- Distribution des périodes ON: **queue lourde** d'indice  $\alpha_{ON} > 1$

## Théorème (Taqqu et al., 1997)

Dans la limite où le nombre de sources  $N_{src}$  est grand, et si:

- chaque flot a un débit constant,
- tous les flots ont le même débit;

alors la bande passante agrégée  $B^{(\Delta)}(t)$  est à **longue mémoire**, de paramètre:

$$H = \frac{3 - \alpha_{ON}}{2} \quad \text{si } \alpha_{ON} < 2; \quad \frac{1}{2} \quad \text{si } \alpha_{ON} \geq 2.$$

- **Longue mémoire: corrélation à long terme** ( $\alpha_{ON} < 2$ )

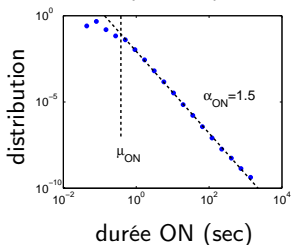
$$\text{Cov}_{B^{(\Delta)}}(\tau) = \mathbb{E} \left\{ B^{(\Delta)}(t) B^{(\Delta)}(t + \tau) \right\} \underset{\tau \rightarrow \infty}{\sim} \tau^{(2H-2)}, \quad -1 < 2H-2 < 0$$

- La variance grandit plus vite que  $\Delta$ :  $\text{Var} \{ B^{(\Delta)}(t) \} \sim \Delta^{2H}$

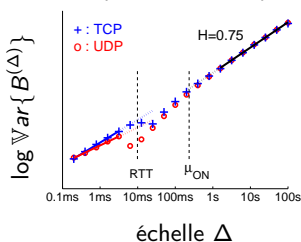
# Influence du protocole (débit variable au sein d'un flot)

- Expérience contrôlée: *MetroFlux* 1 Gbps, 100 sources, 8 heures, distributions à queues lourdes imposées
- UDP/TCP: contrôle de débit à 5 Mbps (pas de congestion)

Distribution ON  
(source)



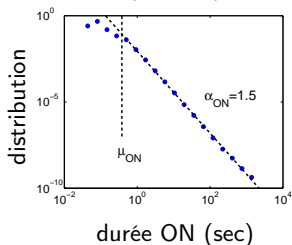
Log-diagramme  
(trafic agrégé)



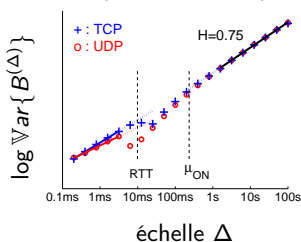
# Influence du protocole (débit variable au sein d'un flot)

- Expérience contrôlée: *MetroFlux* 1 Gbps, 100 sources, 8 heures, distributions à queues lourdes imposées
- UDP/TCP: contrôle de débit à 5 Mbps (pas de congestion)

Distribution ON  
(source)



Log-diagramme  
(trafic agrégé)



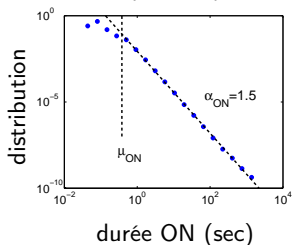
- ⇒ Le protocole est sans influence aux grandes échelles
- ⇒ La longue mémoire apparaît au delà de l'échelle  $\Delta = \mu_{ON}$  (durée moyenne des flots)



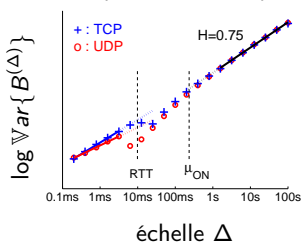
# Influence du protocole (débit variable au sein d'un flot)

- Expérience contrôlée: *MetroFlux* 1 Gbps, 100 sources, 8 heures, distributions à queues lourdes imposées
- UDP/TCP: contrôle de débit à 5 Mbps (pas de congestion)

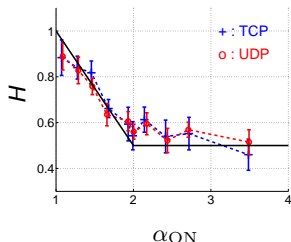
Distribution ON  
(source)



Log-diagramme  
(trafic agrégé)



Relation de Taqqu

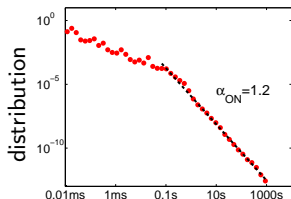


- ⇒ Le protocole est sans influence aux grandes échelles
- ⇒ La longue mémoire apparaît au delà de l'échelle  $\Delta = \mu_{ON}$  (durée moyenne des flots)

## Influence de la corrélation débit moyen/durée des flots

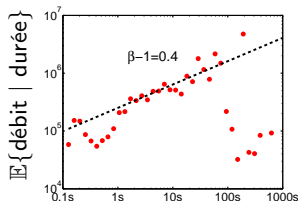
- Trafic web in2p3 (Lyon), acquis avec *MetroFlux* 10 Gbps

Distribution ON



durée ON

Débit moyen



durée

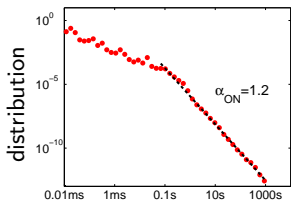
- Périodes ON à queue lourde,  $\alpha_{ON} = 1.2$
- Le débit d'un flot est corrélé à sa durée:

$$\mathbb{E}\{\text{débit}|\text{durée}\} \propto (\text{durée})^{\beta-1}, \quad \beta = 1.4$$

## Influence de la corrélation débit moyen/durée des flots

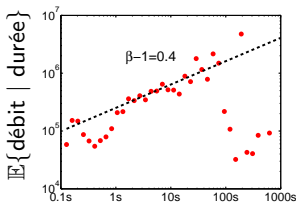
- Trafic web in2p3 (Lyon), acquis avec *MetroFlux* 10 Gbps

Distribution ON



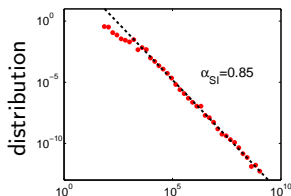
durée ON

Débit moyen



durée

Distribution tailles



taille

- Périodes ON à queue lourde,  $\alpha_{ON} = 1.2$
- Le débit d'un flot est corrélé à sa durée:

$$\mathbb{E}\{\text{débit}|\text{durée}\} \propto (\text{durée})^{\beta-1}, \quad \beta = 1.4$$

- Tailles des flots: queue lourde d'indice différent  $\alpha_{SI} = \frac{\alpha_{ON}}{\beta} = 0.85$
- ⇒ Quel indice de queue lourde contrôle la longue mémoire ? ( $\alpha_{ON}$ ,  $\alpha_{SI}$ )?

## Extension du modèle de Taqqu

- Processus de Poisson dans le plan: (instant arrivée, durée)

Proposition (L. et al., 2009)

Modèle:  $\mathbb{E}\{\text{débit}|\text{durée}\} = M \cdot (\text{durée})^{\beta-1}$ ;  $\text{Var}\{\text{débit}|\text{durée}\} = V$

$$\text{Cov}_{B(\Delta)}(\tau) = CM^2\tau^{-(\alpha_{ON}-2(\beta-1))+1} + C'V\tau^{-\alpha_{ON}+1}$$

## Extension du modèle de Taqqu

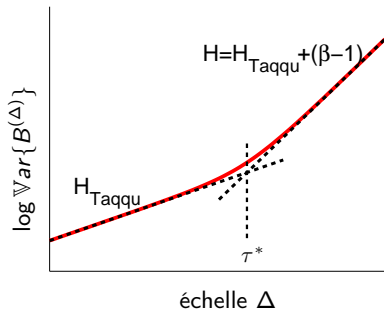
- Processus de Poisson dans le plan: (instant arrivée, durée)

Proposition (L. et al., 2009)

Modèle:  $\mathbb{E}\{\text{débit}|durée\} = M \cdot (durée)^{\beta-1}$ ;  $\text{Var}\{\text{débit}|durée\} = V$

$$\text{Cov}_{B(\Delta)}(\tau) = CM^2\tau^{-(\alpha_{ON}-2(\beta-1))+1} + C'V\tau^{-\alpha_{ON}+1}$$

Log-diagramme,  $\beta > 1$



- frontière  $\tau^* = \left(\frac{C'V}{CM^2}\right)^{1/(2(\beta-1))}$

## Extension du modèle de Taqqu

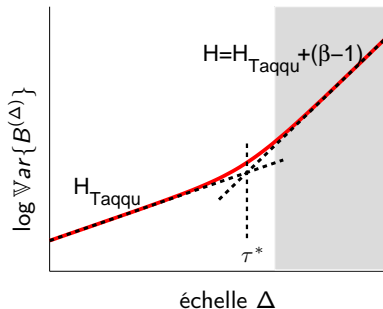
- Processus de Poisson dans le plan: (instant arrivée, durée)

Proposition (L. et al., 2009)

Modèle:  $\mathbb{E}\{\text{débit}|durée\} = M \cdot (durée)^{\beta-1}$ ;  $\text{Var}\{\text{débit}|durée\} = V$

$$\text{Cov}_{B(\Delta)}(\tau) = CM^2\tau^{-(\alpha_{ON}-2(\beta-1))+1} + C'V\tau^{-\alpha_{ON}+1}$$

Log-diagramme,  $\beta > 1$



- frontière  $\tau^* = \left(\frac{C'V}{CM^2}\right)^{1/(2(\beta-1))}$   
 $\rightarrow$  si  $\Delta \gg \tau^*$ :  $H = H_{\text{Taqqu}} + (\beta - 1)$

# Extension du modèle de Taqqu

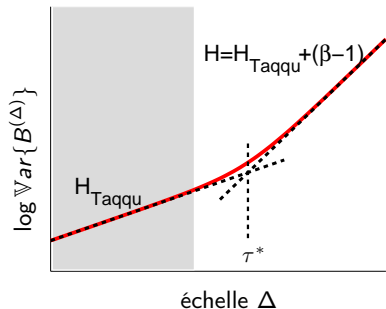
- Processus de Poisson dans le plan: (instant arrivée, durée)

Proposition (L. et al., 2009)

Modèle:  $\mathbb{E}\{\text{débit}|durée\} = M \cdot (durée)^{\beta-1}$ ;  $\text{Var}\{\text{débit}|durée\} = V$

$$\text{Cov}_{B(\Delta)}(\tau) = CM^2\tau^{-(\alpha_{ON}-2(\beta-1))+1} + C'V\tau^{-\alpha_{ON}+1}$$

Log-diagramme,  $\beta > 1$



- frontière  $\tau^* = \left(\frac{C'V}{CM^2}\right)^{1/(2(\beta-1))}$ 
  - $\rightarrow$  si  $\Delta \gg \tau^*$ :  $H = H_{\text{Taqqu}} + (\beta - 1)$
  - $\rightarrow$  si  $\Delta \ll \tau^*$ :  $H = H_{\text{Taqqu}}$

## Extension du modèle de Taqqu

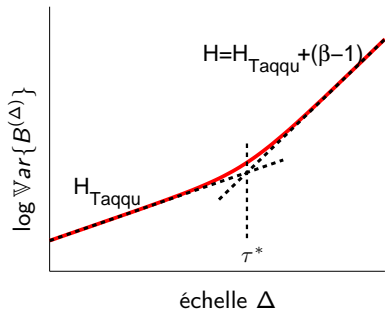
- Processus de Poisson dans le plan: (instant arrivée, durée)

Proposition (L. et al., 2009)

Modèle:  $\mathbb{E}\{\text{débit}|durée\} = M \cdot (durée)^{\beta-1}$ ;  $\text{Var}\{\text{débit}|durée\} = V$

$$\text{Cov}_{B(\Delta)}(\tau) = CM^2\tau^{-(\alpha_{ON}-2(\beta-1))+1} + C'V\tau^{-\alpha_{ON}+1}$$

Log-diagramme,  $\beta > 1$



- la longue mémoire est accentuée par la corrélation ( $\beta > 1$ )
- Évolution du trafic, futur Internet: mécanismes de contrôle "flow-aware", FTTH



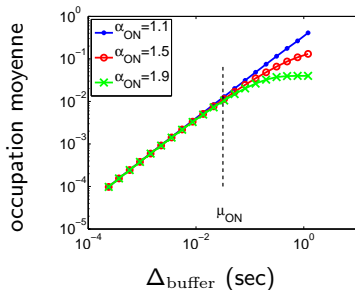
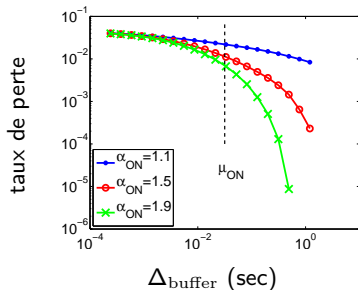
## Impact sur la QoS: UDP

- Modèles théoriques: [Mandjes, 2004] **buffer infini**:

$$\mathbb{P}(\text{remplissage} > \text{seuil}) : \begin{cases} \text{insensible à } \alpha_{ON} \text{ si seuil faible} \\ \text{diminue avec } \alpha_{ON} \text{ si seuil grand} \end{cases}$$

# Impact sur la QoS: UDP

- Modèles théoriques: [Mandjes, 2004] **buffer infini**:  
 $\mathbb{P}(\text{remplissage} > \text{seuil}) : \begin{cases} \text{insensible à } \alpha_{ON} \text{ si seuil faible} \\ \text{diminue avec } \alpha_{ON} \text{ si seuil grand} \end{cases}$
- Simulations matlab (50 src): **buffer fini**,  $\Delta_{\text{buffer}} = \frac{\text{taille buffer}}{\text{capacité du lien}}$



- La longue mémoire **dégrade la QoS** pour les “grands” buffers
- Le **seuil grand/petit buffer** dépend de la métrique considérée

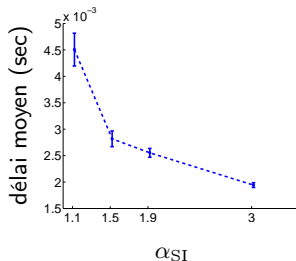
## Impact sur la QoS: TCP

- TCP: pas de “modèle simple”
  - [Park, 1997]: dégradation pour faible  $\alpha_{SI}$
  - [Ben Fredj, 2001]: insensibilité par rapport à  $\alpha_{SI}$

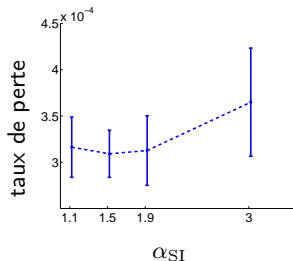
## Impact sur la QoS: TCP

- TCP: pas de “modèle simple”
  - [Park, 1997]: dégradation pour faible  $\alpha_{SI}$
  - [Ben Fredj, 2001]: insensibilité par rapport à  $\alpha_{SI}$
- Expériences *MetroFlux* 1 Gbps (45 src),  $\Delta_{buffer} \sim RTT(10 \text{ ms})$

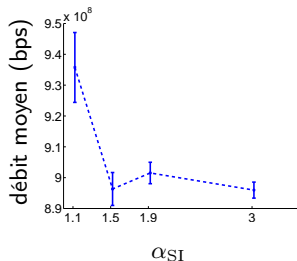
Délai



Pertes



Débit

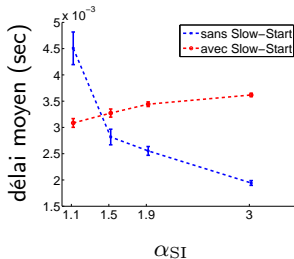


- *ssthresh*: mis en cache (flots successifs d'une machine)  $\rightarrow$  décroît
  - par défaut  $\rightarrow$  peu de Slow-Start

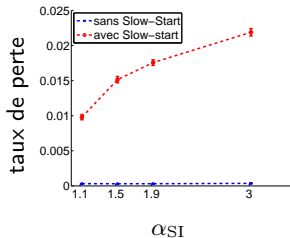
## Impact sur la QoS: TCP

- TCP: pas de “modèle simple”
  - [Park, 1997]: dégradation pour faible  $\alpha_{SI}$
  - [Ben Fredj, 2001]: insensibilité par rapport à  $\alpha_{SI}$
- Expériences *MetroFlux* 1 Gbps (45 src),  $\Delta_{\text{buffer}} \sim RTT(10 \text{ ms})$

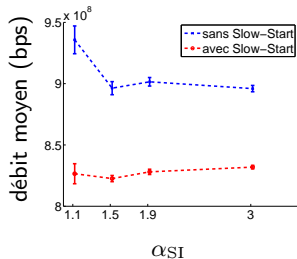
Délai



Pertes



Débit

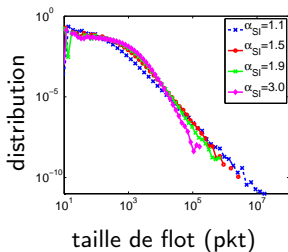


- `ssthresh`: mis en cache (flots successifs d'une machine)  $\rightarrow$  décroît
  - par défaut  $\rightarrow$  peu de Slow-Start
  - en forçant la réinitialisation  $\rightarrow$  Slow-Start
- L'évolution en fonction de  $\alpha_{SI}$  dépend de **paramètres complexes**

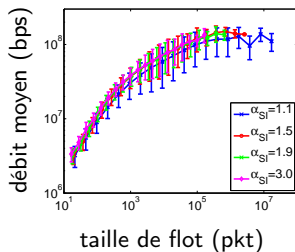
## Impact sur la QoS: TCP II

- Un élément d'interprétation: les régimes transitoires
  - Sans Slow-start: long et doux
  - Avec Slow-Start: court mais violent

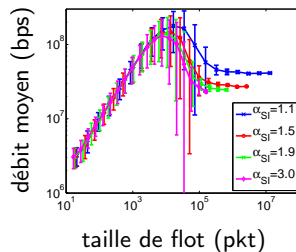
Distribution tailles



Sans Slow-Start



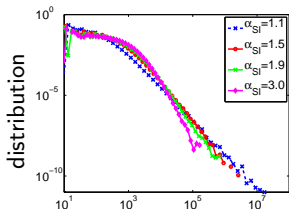
Avec Slow-Start



## Impact sur la QoS: TCP II

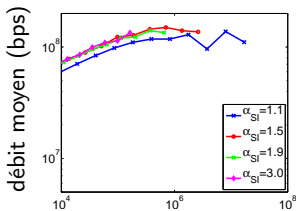
- Un élément d'interprétation: les régimes transitoires
  - Sans Slow-start: long et doux
  - Avec Slow-Start: court mais violent

Distribution tailles



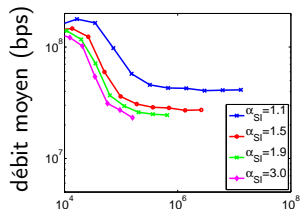
taille de flot (pkt)

Sans Slow-Start



taille de flot (pkt)

Avec Slow-Start



taille de flot (pkt)

- Une distribution à queue lourde “peut améliorer la QoS”
- L'effet de  $\alpha_{SI}$  dépend de “tout”: métrique considérée, paramètre d'optimisation de TCP, taille du buffer, corps de la distribution, etc.

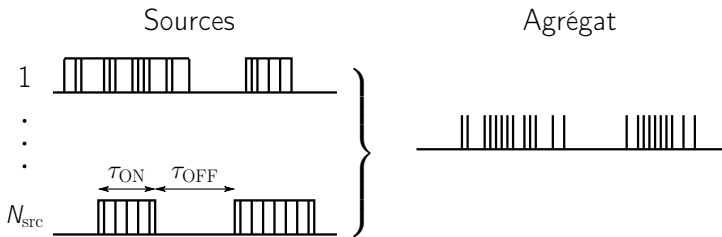
⇒ Expériences en environnement réel

# Plan

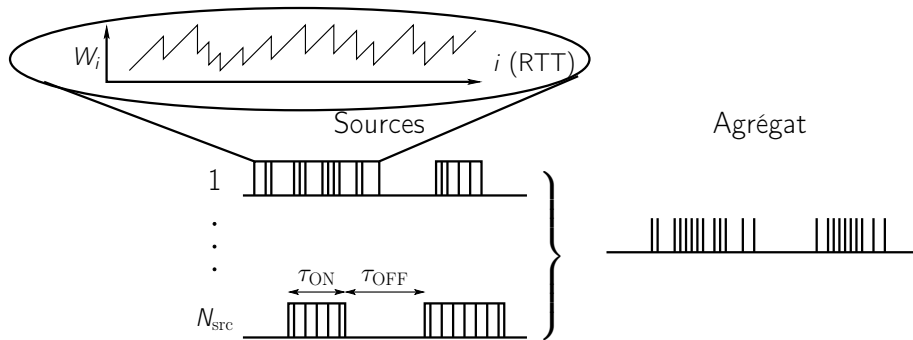
- 1 Plate-forme pour les expériences contrôlées
- 2 Trafic agrégé à grande échelle et qualité de service
- 3 Trafic TCP au niveau paquet et performances**



## Deuxième niveau de description: trafic d'une source TCP

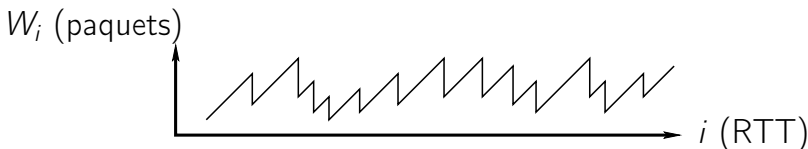


## Deuxième niveau de description: trafic d'une source TCP



- Détail du trafic d'une source TCP
  - Long flot ("long-lived") → partie stationnaire
- ⇒ Comment caractériser l'évolution de la fenêtre de congestion ?

## Modèle de Markov

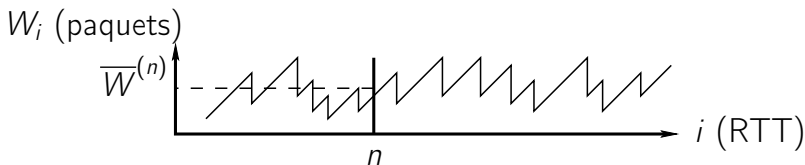


- Partie stationnaire d'un long flot: AIMD
- Modèle:  $(W_i)_{i \geq 1}$  chaîne de Markov finie (irréductible, apériodique), matrice de transition  $Q$  :

$$\begin{cases} Q_{w, \min(w+1, w_{\max})} &= 1 - p(w), \\ Q_{w, \max(\lfloor w/2 \rfloor, 1)} &= p(w). \end{cases}$$

- $p(\cdot)$  probabilité d'au moins une perte, ne dépend que de la fenêtre de congestion courante (hyp.)
- Exemple: [Padhye, 1998] pertes Bernoulli:  $p(w) = 1 - (1 - p_{\text{pkt}})^w$

## Débit moyen presque sûr



- Débit moyen à l'échelle  $n$  (RTT):  $\overline{W}^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{n}$

Théorème ergodique Birkhoff (1931): moyenne presque sûre

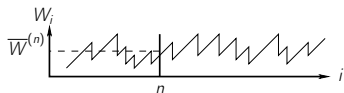
Pour *presque toute réalisation*, le débit moyen à l'échelle  $n$  converge vers une valeur correspondant à la moyenne de la *distribution invariante*:

$$\overline{W}^{(n)} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{p.s.} \overline{W}^{(\infty)} = \mathbb{E}\{W_i\}$$

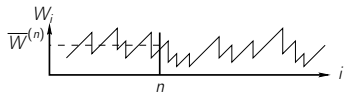
- Exemple: [Padhye, 1998],  $\overline{W}^{(\infty)} \underset{\rho_{\text{pkt}} \rightarrow 0}{\sim} \sqrt{\frac{3}{2\rho_{\text{pkt}}}}$  (RTT=1, MSS=1)

# Variabilité du débit: grandes déviations

- $\overline{W}^{(n)} \simeq \alpha \neq \overline{W}^{(\infty)}$  événement rare



•  
•  
•

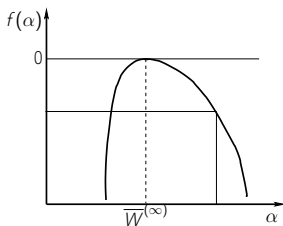


•  
•  
•

Théorème grandes déviations (Ellis, 84)

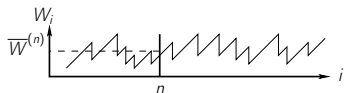
$$\mathbb{P}(\overline{W}^{(n)} \simeq \alpha) \underset{n \rightarrow \infty}{\sim} \exp(n \cdot f(\alpha))$$

- $f(\alpha)$  spectre de grandes déviations
- quantité invariante d'échelle

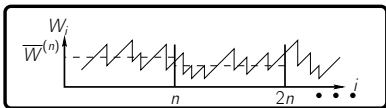


# Variabilité du débit: grandes déviations

- $\overline{W}^{(n)} \simeq \alpha \neq \overline{W}^{(\infty)}$  événement rare



⋮

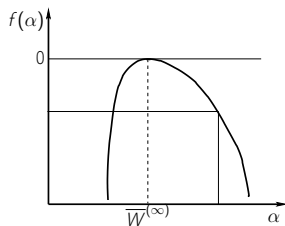


⋮

Théorème grandes déviations (Ellis, 84)

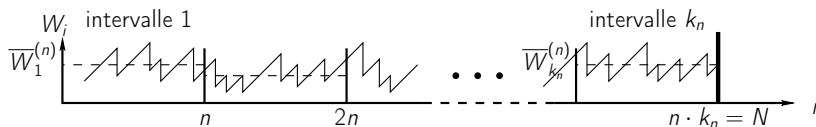
$$\mathbb{P}(\overline{W}^{(n)} \simeq \alpha) \underset{n \rightarrow \infty}{\sim} \exp(n \cdot f(\alpha))$$

- $f(\alpha)$  spectre de grandes déviations
- quantité invariante d'échelle



⇒ A-t-on un théorème similaire sur une réalisation ?

## Grandes déviations sur presque toute réalisation



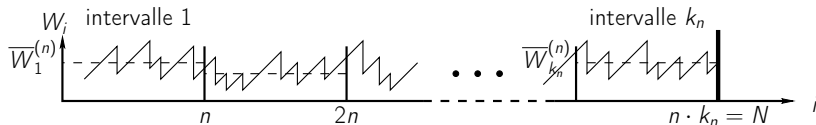
Théorème grandes déviations sur presque toute réalisation (L. et al., 2009)

Pour une valeur de  $\alpha$  donnée, si  $k_n \geq e^{nR(\alpha)}$ , alors p.s.

$$\frac{\#\{j \in \{1, \dots, k_n\} : \overline{W}_j^{(n)} \simeq \alpha\}}{k_n} \underset{n \rightarrow \infty}{\sim} \exp(n \cdot f(\alpha))$$

- “Prix à payer”: croissance exponentielle du nombre d’intervalles
  - Réalisation de taille finie  $N \rightarrow$  contrainte  $n \cdot k_n = N$
- $\Rightarrow [\alpha_{\min}(n), \alpha_{\max}(n)]$  partie du spectre observable à l’échelle  $n$

## Grandes déviations sur presque toute réalisation



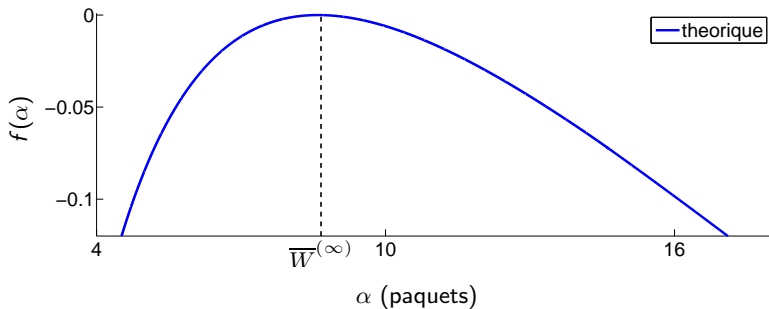
Théorème grandes déviations sur presque toute réalisation (L. et al., 2009)

Pour une valeur de  $\alpha$  donnée, si  $k_n \geq e^{nR(\alpha)}$ , alors p.s.

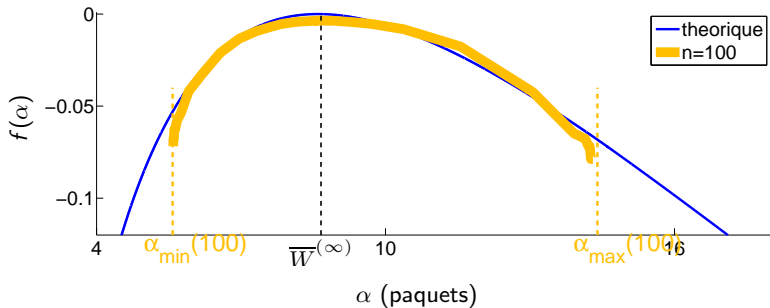
$$\frac{\#\{j \in \{1, \dots, k_n\} : \overline{W}_j^{(n)} \simeq \alpha\}}{k_n} \underset{n \rightarrow \infty}{\sim} \exp(n \cdot f(\alpha))$$

- “Prix à payer”: croissance exponentielle du nombre d’intervalles
  - Réalisation de taille finie  $N \rightarrow$  contrainte  $n \cdot k_n = N$
- $\Rightarrow [\alpha_{\min}(n), \alpha_{\max}(n)]$  partie du spectre observable à l’échelle  $n$
- Théorie:  $p(\cdot) \rightarrow Q \rightarrow f(\alpha), R(\alpha), \alpha_{\min}, \alpha_{\max}$
  - Pratique:  $(W_i)_{i \leq N} \rightarrow$  distribution observée



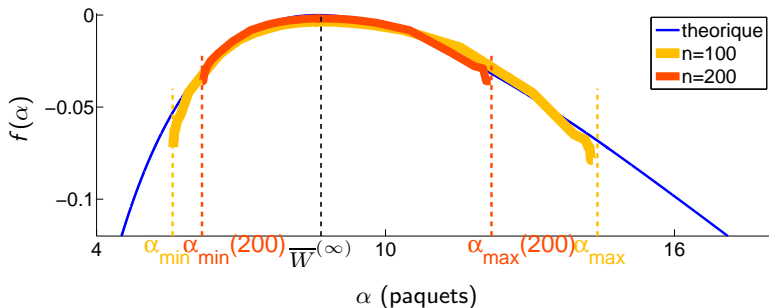
Résultats: exemple des pertes de Bernoulli ( $p_{\text{pkt}} = 0.02$ )

## Résultats: exemple des pertes de Bernoulli ( $p_{\text{pkt}} = 0.02$ )



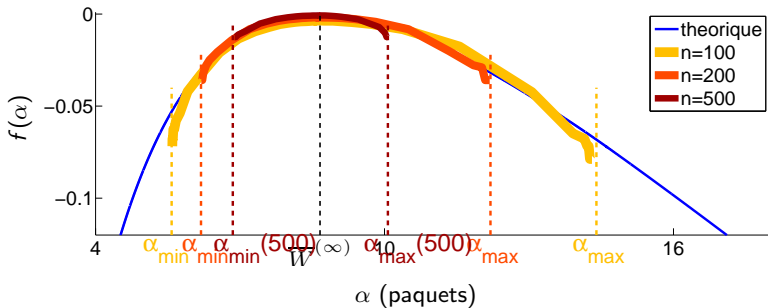
- Apex: moyenne presque sûre: 8.6 paquets (Padhye:  $\sqrt{\frac{3}{2p_{\text{pkt}}}} = 8.66$ )

## Résultats: exemple des pertes de Bernoulli ( $p_{\text{pkt}} = 0.02$ )



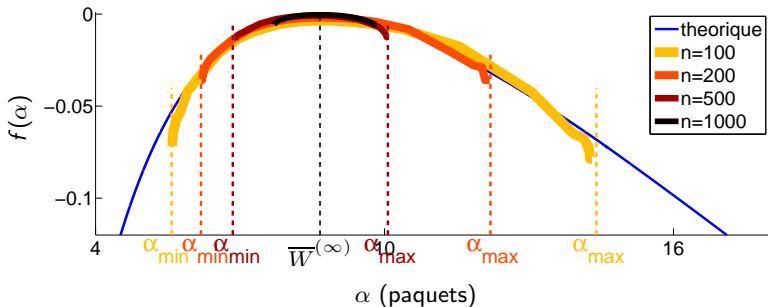
- Apex: moyenne presque sûre: 8.6 paquets (Padhye:  $\sqrt{\frac{3}{2p_{\text{pkt}}}} = 8.66$ )

## Résultats: exemple des pertes de Bernoulli ( $p_{\text{pkt}} = 0.02$ )



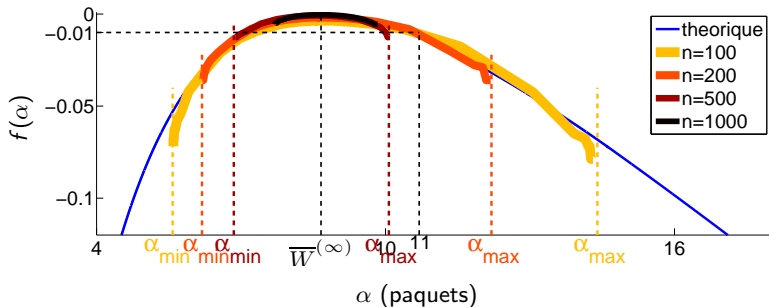
- Apex: moyenne presque sûre: 8.6 paquets (Padhye:  $\sqrt{\frac{3}{2p_{\text{pkt}}}} = 8.66$ )

## Résultats: exemple des pertes de Bernoulli ( $p_{\text{pkt}} = 0.02$ )



- Apex: moyenne presque sûre: 8.6 paquets (Padhye:  $\sqrt{\frac{3}{2p_{\text{pkt}}}} = 8.66$ )
- Superposition à différentes échelles → **invariance d'échelle**

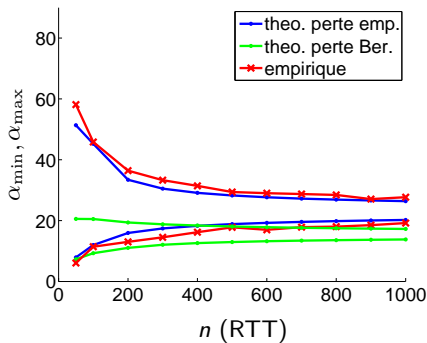
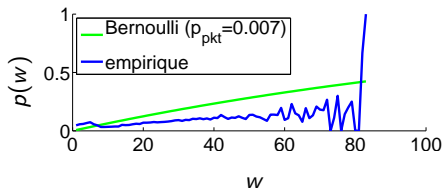
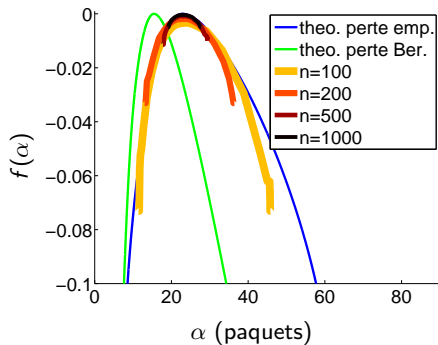
## Résultats: exemple des pertes de Bernoulli ( $p_{\text{pkt}} = 0.02$ )



- Apex: moyenne presque sûre: 8.6 paquets (Padhye:  $\sqrt{\frac{3}{2p_{\text{pkt}}}} = 8.66$ )
  - Superposition à différentes échelles → **invariance d'échelle**
  - A partir de  $n = 100$ : variabilité
    - $n = 100$ , proportion d'intervalles de moyenne  $\sim 11$ :  $e^{-100 \times 0.01} = 0.37$
    - $n = 200$ , proportion d'intervalles de moyenne  $\sim 11$ :  $e^{-200 \times 0.01} = 0.14$
- ⇒ **Information plus précise que la moyenne presque sûre**

# Résultats II: cas d'un long flot parmi 45 sources ON/OFF

- pertes: pas Bernoulli
- pertes empiriques



# Conclusion

- Plate-forme de métrologie *MetroFlux*
- Connaissance du trafic au niveau agrégé
  - limites modèles théoriques longue mémoire (Taqqu)
  - découverte et modélisation de nouvelles caractéristiques du trafic réel:
    - ▶ corrélation débit-durée des flots → accentue la longue mémoire
  - impact de la longue mémoire / des queues lourdes sur la QoS:
    - ▶ confirmation et extension de résultats théoriques (UDP, buffer fini)
    - ▶ mise en défaut de modèles trop simplifiés (TCP)
- Connaissance du trafic au niveau source
  - théorème de grandes déviations pour les chaînes de Markov
    - ▶ description du trafic TCP plus fine que sa moyenne



# Perspectives

- On est encore loin d'une compréhension totale du trafic (TCP)
  - Evolutions des protocoles:
    - nouvelles variantes TCP agressives
    - trafic UDP
  - Evolutions structurelles
    - procédures de contrôles "flow-aware"
    - FTTH, évolution des débits
  - Internet du futur: utilisation de la métrologie pour optimiser les prises de décision
- ⇒ la plate-forme *MetroFlux* reste un outil d'investigation important
- ⇒ la méthode théorie / expériences reste une bonne approche

- Développement d'une plate-forme de métrologie
  - EuroNF'08, TridentCom'09, démo Sigmetrics'09 ("best demo award")
- Étude des propriétés du trafic agrégé à grande échelle
  - étude expérimentale de la relation de Taqqu: ToN 2010, EuroNF'08
  - extension du modèle de Taqqu (en cours)
  - étude expérimentale de l'impact sur la qualité de service (en cours)
- Estimation du paramètre de queue lourde sous échantillonnage
  - GridNets'07, Sigmetrics'09
- Étude des propriétés multifractales du trafic TCP au niveau paquet
  - théorème de grandes déviations pour les processus mélangeants (en cours)
  - application à l'évaluation des performances d'une source TCP (en cours)