

## 4 Résumé de la thèse

La stabilité et l'équité du trafic de données sur Internet sont assurées par des mécanismes de bout en bout, selon un processus à événements discrets spécifié par le protocole TCP. Nous nous attachons dans cette thèse à caractériser le comportement à grande échelle de ce système décentralisé qui repose sur l'interaction d'un grand nombre de flots.

Dans le premier chapitre, nous étudions le partage des ressources de bande passante et de mémoire d'un lien par une large population de flots interagissant en parallèle.

- Pour une demande persistente de trafic, nous décrivons la loi du débit instantané obtenu par chaque flot dans une expression en forme close. Ce résultat est une extension d'un modèle d'interaction fluide de champ moyen proposé par Baccelli et Hong. Il caractérise explicitement les propriétés fractales de régime limite, auparavant observées empiriquement.
- Le cas d'une demande intermittente de trafic offre un comportement remarquable. Nous analysons un cas d'école : une alternance de périodes d'activité-inactivité correspondant à des documents ou des attentes de tailles exponentiellement distribuées. Ceci permet d'appliquer l'hypothèse de Markov ; le régime limite de champ moyen est alors décrit par un ensemble d'équations différentielles. L'originalité du résultat obtenu est que plusieurs régimes d'équilibre peuvent être obtenus en fonction des conditions initiales. Nous décrivons en détail deux régimes, et démontrons dans certaines conditions l'apparition d'un phénomène de turbulence.

Dans le deuxième chapitre de cette thèse, nous construisons un transport fiable et équitable pour le trafic multipoint "un vers beaucoup". Nous nous attachons à l'étude des protocoles sur des réseaux applicatifs, inspirés des architectures pair-à-pair. Ces services peuvent être déployés sans aucune modification des éléments du réseau.

- Nous montrons comment intégrer un service multipoint fiable au trafic existant à l'aide de flots TCP interagissant en série dans un arbre, via des mémoires tampons locales limitées. Le comportement dynamique d'adaptation de chaque connection aux délais et aux pertes sur un lien est étudié dans un modèle microscopique de niveau paquet. Ce modèle prouve qu'un débit positif est garanti indépendamment de la taille, et que le délai à l'équilibre dans une branche de l'arbre grandit linéairement, même quand les mémoires tampons intermédiaires sont illimitées.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous étudions une classe générale de systèmes distribués illimités. Leur évolution est décrite par le processus de temps de dernière percolation, dans des graphes aléatoires réguliers (i.e. les graphes qui sont invariants par certaines transformations, comme par exemple une grille

dirigée par les translations). Cette classe contient en particulier le modèle de protocole décrit dans le deuxième chapitre.

Le résultat principal de passage à l'échelle qui nous occupe est le suivant : le processus des temps de réalisation grandit, linéairement, en fonction de ses indices, même pour un système de taille infinie. Nous montrons que ce résultat s'obtient à partir de deux éléments : (1) une condition sur la loi du temps de passage d'un site, qui dépend des propriétés combinatoires du graphe, et (2) une condition nouvelle sur la relation de récurrence, dite *critère de pointe*. Cette dernière permet localement une variété d'interactions, mais elle assure que l'évolution globale du système ne s'éloigne pas d'une direction de l'espace.

- Nous établissons d'abord le résultat dans le cadre de systèmes organisés le long d'une grille. Pour ceux-là, une condition établie depuis déjà plusieurs décennies caractérise les systèmes sans blocage ; nous démontrons que le critère de pointe est strictement plus fort. Il est suffisant (pour établir le résultat énoncé ci-dessus), mais aussi nécessaire (au moins pour la dimension 2). La condition (1) se déduit des propriétés combinatoires des ensembles connectés de la grille et ne dépend que de la dimension.
- Nous montrons ensuite un résultat plus précis pour un système décrit sur une grille de dimension 2 : il est possible, comme c'est le cas pour une file d'attente, de construire un régime d'équilibre stationnaire selon un de ses indices. Nous prouvons que, dans ce régime d'équilibre, les temps de réalisation vérifient une loi des grands nombres selon le deuxième indice. Le taux asymptotique et la condition de stabilité se définissent par une limite hydrodynamique du système étudié.
- Nous considérons enfin le cas général des systèmes organisés le long de graphes réguliers, comme par exemple le long d'arbres infinis. Nous montrons que le premier résultat obtenu plus haut se vérifie dès qu'une projection sur une grille satisfait le critère de pointe, à condition que la loi des temps de passage d'un site admette un moment exponentiel. Cette dernière hypothèse est aussi en général une condition nécessaire, comme le montre un contre-exemple valable pour tout autre loi.