

# Réseaux Datacenter et HPC

Notions spécifiques aux réseaux datacenter/HPC

Elodie Ardoin, Damien Gros

9 avril 2018

# Qui sommes-nous ?

- ▶ Laboratoire réseau du DSSI
- ▶ Réseau d'entreprise classique
- ▶ Réseau d'interconnect HPC
- ▶ Sécurité réseau
- ▶ etc.

# Les stages au CEA

- ▶ La liste des stages au CEA <http://www.cea.fr/emploi/Pages/stages/offres-stage.aspx>
- ▶ Thématiques possibles au sein du laboratoire :
  - ▶ L'interconnect HPC
  - ▶ Software Defined Network
  - ▶ Sécurité des réseaux
  - ▶ Vos propres idées!

# Les réseaux

- ▶ Qu'est-ce qu'un réseau ?
- ▶ Où trouve-t-on les réseaux ?
- ▶ Pourquoi les réseaux sont-ils importants ?

# Les réseaux d'interconnexion

- ▶ Qu'est-ce qu'un réseau d'interconnexion ?
- ▶ Où trouve-t-on les réseaux d'interconnexion ?
- ▶ Pourquoi les réseaux d'interconnexion sont-ils importants ?

# Qu'est-ce qu'un réseau d'interconnexion ?

- ▶ Système configurable qui transporte des données entre des terminaux :
  - ▶ Configurable car il établit différentes connexions entre différents points dans le temps
  - ▶ Système car composé de différents éléments : buffers mémoire, canaux, commutateur et plan de contrôle
- ▶ Dans les systèmes de calcul : connecte les processeurs à la mémoire, ou les systèmes d'I/O aux contrôleurs I/O
- ▶ Dans les systèmes de commutation : connecte les ports d'entrée aux ports de sortie
- ▶ Les interconnexions haute-performance sont réalisées via des interconnexions point-à-point (no bus)
- ▶ Élément de limitation de la performance :
  - ▶ Bande passante et latence d'accès à la mémoire
  - ▶ Vitesse de commutation et nombre de ports du switch
- ▶ Centre de coût :
  - ▶ 50% de la consommation électrique
  - ▶ 33% des investissements matériel

# Existe-t'il des technologies réseaux spécifiques ?

- ▶ Les réseaux Ethernet
- ▶ Les réseaux Infiniband
- ▶ Les réseaux avec des technologies spécifiques

# Différence entre les réseaux HPC et Datacenter

- ▶ Qu'est-ce qu'un DataCenter ?
- ▶ Quelles sont les points communs entre ces deux types de réseau ?
- ▶ Quelles sont les différences avec le HPC ? En terme de machines ?  
En terme de locaux ?
- ▶ La notion de disponibilité ? Qu'est-ce que cela implique pour ces deux architectures ?
- ▶ Quelle notion de performance pour un datacenter ?
- ▶ Quels sont les objectifs pour un datacenter ?



# Le contenu de l'UE

- ▶ Les réseaux d'interconnexion de cluster dédié au calcul massivement parallèle
- ▶ Focus sur la technologie Infiniband
- ▶ Les architectures réseaux Datacenter
- ▶ La configuration au travers d'interface virtuelle (= abstraction)
- ▶ L'automatisation et la provision à la demande

# Le contenu du cours

- ▶ Beaucoup de vocabulaires
1. Les topologies spécifiques des réseaux d'interconnexion
  2. Les différents types/algorithmes de routage
  3. Le switching, la gestion de la congestion, etc.

# Module 1

- ▶ Notions génériques et problématiques liées au HPC
- ▶ Intervenants : E.Ardoin, D.Gros
- ▶ 3(\*3h30) cours, 3(\*3h30) séances de TPs

# Examen et notations

- ▶ Pas d'examen sur table
- ▶ 1 rapport à la fin du dernier TP : lundi 14 mai, les détails sont sur le sujet du TP
- ▶ Participation en cours : exercices à faire
- ▶ Supports disponibles à la fin du cours

# Les objectifs de ce module

- ▶ Cours : Comprendre les problématiques des réseaux d'interconnexion d'un ordinateur
  - ▶ Connaître les grands principes d'architecture d'interconnexion d'un ordinateur
  - ▶ Comprendre les problématiques : performance, efficacité, résilience
- ▶ TP :
  - ▶ Manipuler les outils de simulation
  - ▶ Comprendre les principes de topologie, routage et impact du placement/routage
  - ▶ Les éléments qui permettent de comprendre des questions de congestion

# Bibliographie

Besta, M. and Hoefler, T. (2014). Slim fly : A cost effective low-diameter network topology. In Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, SC '14, pages 348–359, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.

Dally, W. and Towles, B. (2003). Principles and Practices of Interconnection Networks. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.

Duato, J., Yalamanchili, S., and Lionel, N. (2002). Interconnection Networks : An Engineering Approach. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.

# Plan du cours

## Contexte du cours

- Enjeux et problématiques
- Configuration type d'un ordinateur

## Topologie

- Quelques topologies spécifiques
- Comparaison des topologies

# Plan du cours

## Contexte du cours

- Enjeux et problématiques
- Configuration type d'un ordinateur

## Topologie

- Quelques topologies spécifiques
- Comparaison des topologies



# D'où vient la performance d'un calculateur ?

- ▶ Fréquence *brute* du processeur (*ie* : nombre d'opérations par seconde)
- ▶ Mémoire : taille de la mémoire, des caches ainsi que le temps d'accès ; les caches L1 et L2 sont d'accès plus rapides que la RAM
- ▶ Latence : temps d'acheminement d'un paquet au travers du réseau
- ▶ Réseau d'interconnexion :
  - ▶ Débit : volume de données acheminées aux terminaux du réseau
  - ▶ Topologie du réseau : le placement physique des éléments du réseau
  - ▶ Routage : les chemins empruntés (ou possibles) d'un paquet pour aller d'un nœud source au nœud destination
  - ▶ Placement des *jobs* : comment sont répartis les *jobs* au sein du cluster

# Les problématiques réseaux liés au calcul parallèle

- ▶ L'augmentation de la taille des calculs induit une forte augmentation des phases d'échanges de données
- ▶ Pour garantir l'efficacité de la parallélisation, il y est nécessaire de minimiser ces temps de synchronisation :
  - ▶ Garantir la performance du réseau (latence minimale et stable, débit garanti)
  - ▶ Recouvrir des phases d'échange des données par du calcul (asynchronisme des communications)
  - ▶ Optimiser les communications ( RDMA, algorithmique des communications collectives, etc)
  - ▶ Garantir la fiabilité du transfert des messages
  - ▶ Garantir l'ordre d'arrivé des messages (important pour MPI)
- ▶ Pour garantir l'efficacité du réseau, il faut aussi minimiser les coûts :
  - ▶ Coût d'acquisition (matériel)
  - ▶ Coût d'opération (résilience, consommation électrique)
  - ▶ Coût de l'administration
  - ▶ Coût/délai de la maintenance

# Les choix de design au niveau du réseau d'interconnexion

- ▶ Les réseaux massifs connectent tous les nœuds du calcul :
  - ▶ La topologie décrit la connexion physique
  - ▶ Le routage décrit la route à emprunter d'une source vers une destination.
  - ▶ Le mode de commutation décrit comment le message est envoyé sur la route. Il décrit comment sera géré la congestion.
- ▶ Chaque élément influe de manière significative sur la performance mais aussi sur la résilience du réseau d'interconnexion.
- ▶ Il est donc nécessaire de prendre en compte chacun de ces éléments dans le design d'un calculateur.

# Configuration type d'un ordinateur

- ▶ Système d'exploitation : Linux
- ▶ 40 000 cœurs de calculs et traitements Intel® Xeon® de la famille E5 Broadwell, cadencés à 2.4 Ghz
  - ▶ 28 cœurs/nœuds
  - ▶ 128 Go de mémoire/nœuds
- ▶ 4 nœuds grande mémoire à 3 To/nœud
- ▶ 18 nœuds hybrides (Intel Broadwell- Nvidia GPU Pascal)
- ▶ La capacité de stockage local des données est de 2.5 Po.
- ▶ Le réseau d'interconnexion :
  - ▶ Est de technologie InfiniBand EDR.
  - ▶ La topologie d'interconnexion est un Fat-Tree à 3 niveaux, pruné à 1/6.
  - ▶ Le routage est spécifique à la topologie et non-bloquant pour les permutations.
  - ▶ Le routage distingue les nœuds I/O des nœuds de calcul.

# Plan du cours

## Contexte du cours

Enjeux et problématiques

Configuration type d'un ordinateur

## Topologie

Quelques topologies spécifiques

Comparaison des topologies

# Qu'est-ce que la topologie d'un réseau ?

- ▶ C'est la façon d'organiser **physiquement** les différents éléments d'un réseau les uns par rapport aux autres
- ▶ Un réseau d'interconnexion est analogue à une carte routière. Les canaux de communication (routes) transportent les paquets (voitures) d'un routeur (intersection) à un autre.
- ▶ Quelques topologies connues (sur Ethernet) :
  - ▶ En étoile
  - ▶ En anneau
  - ▶ En bus
- ▶ On distingue les topologies :
  - ▶ directes : chaque nœud de la topologie est à la fois un host et un switch
  - ▶ indirectes : les nœuds de la topologie sont soit un host, soit un switch

# Les enjeux de la topologie

- ▶ Les choix de design sont le résultat de compromis (trade-off). Les différents points d'attention sont :
  - ▶ La performance brute : minimiser les distances physiques et le nombre de sauts, garantir le débit entre chacun des nœuds
  - ▶ L'adéquation à la charge : offrir une connectivité suffisamment bonne pour tout type d'algorithmes ayant des patterns divers
  - ▶ La scalabilité et l'extensibilité : conserver les performances dans les phases d'expansion du nombre de nœuds
  - ▶ La facilité de déploiement et les contraintes physiques : densité de câblage, contrôle de la température, etc.
  - ▶ La résilience et la réparabilité : détection et correction automatique des défauts, accès physique aisé
  - ▶ Les contraintes de coût de déploiement et d'opération

# Vocabulaire spécifique à la topologie

- ▶ commutateur/switch : équipement réalisant de la commutation
- ▶ routeur : équipement qui porte une fonction de routage en plus de la fonction de commutation.
- ▶ arité, radix : nombre de ports d'un switch/routeur.
- ▶ pruning : rapport entre le nombre de liens entrants et le nombre de liens sortants
- ▶ terminaux/hosts : nœuds de calcul, serveurs de base de données, serveurs webs, parefeux, etc.
- ▶ leaf/edge : switch d'accès interconnectant des terminaux/hosts.
- ▶ spin/core : switch de cœur de réseau (ou dorsale) interconnectant les switches d'accès (ou leafs)
- ▶ topologie : graphe non-orienté composé de sommets (commutateurs ou nœuds) et d'arêtes (liens, câbles, fibres optique).
- ▶ *diamètre* : distance max en nombre de sauts entre deux terminaux
- ▶ *bisection bandwidth* : bande passante au point milieu du système
- ▶ *hop count* ou distance entre les nœuds : nombre de commutateurs traversés
- ▶ *path diversity* : nombre de chemins distincts entre deux éléments



# High radix router

- ▶ De quelle manière le radix du switch influence la topologie ?
- ▶ Les avantages d'un switch de haut-radix :
  - ▶ Réduit le diamètre du réseau et la latence
  - ▶ Réduit le nombre de câbles (qui peuvent être extrêmement chers)
- ▶ Les inconvénients :
  - ▶ Augmente la longueur des câbles (augmentation de la latence, perte de débit)
  - ▶ Augmente la complexité des routeurs/switchs (réalise plus de traitements)

# Topologie indirecte : Niveau de switch

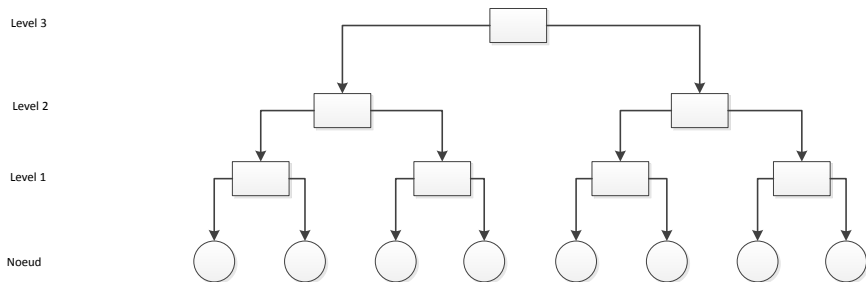
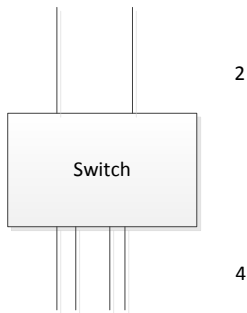


FIGURE – Niveau de switches

# Pruning simple



Pruning =  $2/4 \rightarrow 1/2$

# Pruning

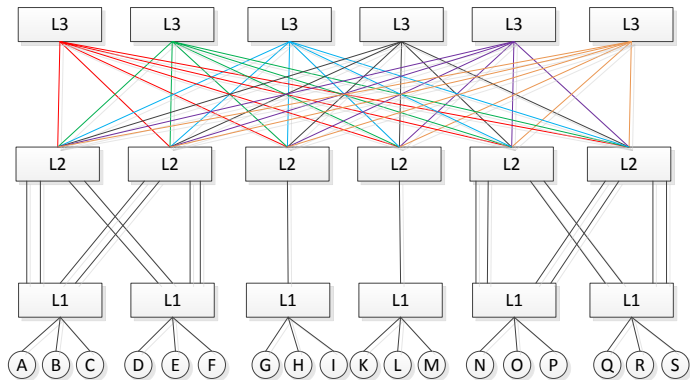


FIGURE – Pruning à l'échelle d'une fabrique

# Bande passante de bisection

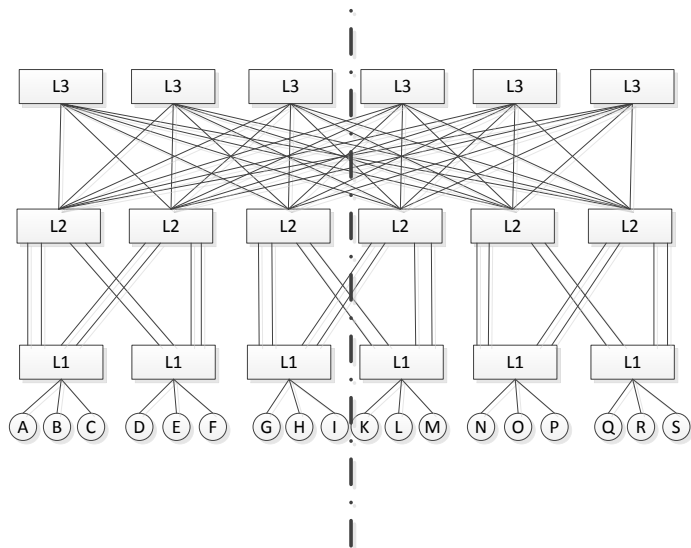


FIGURE – Propriété d'une topologie

## Quelques définitions : bande passante de bisection

- ▶ directional capacity of a network between two equal-sized partitions of nodes. The cut across the network is taken at the narrowest point in each bisection of the network.
- ▶ la bande passante entre deux ensembles disjoints de nœuds connectés au commutateur. Puisque la multitude de combinaisons possibles ne peuvent toutes être vérifiées, on définit l'effective bisection bandwidth par la bande passante moyenne si on mesure la performance de la bisection aléatoire de la communication

# Propriétés d'une topologie

- ▶ On peut définir une topologie réseau suivant plusieurs critères.
- ▶ Ces critères vont influencer les divers choix que l'on pourra faire par la suite (taille des câbles, regroupement en îlots, etc.)
- ▶ Régulière ou irrégulière
  - ▶ Régulière signifie que c'est un graphe régulier
- ▶ Distance moyenne
  - ▶ Moyenne du nombre de sauts empruntés entre deux nœuds
- ▶ Bloquante ou non-bloquante
  - ▶ Si on peut connecter l'ensemble des sources et des destinations, alors la topologie est non bloquante

# Tableaux de comparaison des topologies

Topologie	T3D	T5D	HC	LH-HC	FT-3	DLN	FBF-3	DF
Enpoints(N)	10.648	10.648	8.192	8.192	19.876	40.200	20.736	58.806
Routers ( $N_R$ )	10.648	10.368	8.192	8.192	2.311	4.020	1.728	5.346
Radix(k)	7	11	14	19	43	43	43	43
Electric cables	31.900	50.688	32.768	53.248	19.414	32.488	9.504	56.133
Fiber cables	0	0	12.288	12.888	40.215	33.842	20.739	29.524
Cost per node (\$)	1.682	3.176	4.631	6.481	2.346	1.743	1.570	1.438
Power per node (W)	19,6	30,8	39,2	53,2	14,0	12,04	10,8	10,9

Topologie	FT-3	DLN	FBF-3	DF	DF	SF
Enpoints(N)	10.718	9.702	10.000	9.702	10.890	10830
Routers ( $N_R$ )	1.531	1.386	1.000	1.386	990	722
Radix(k)	35	28	33	27	43	43
Electric cables	7.350	6.837	4.500	9.009	6.885	6.669
Fiber cables	24.806	7.716	10.000	4.900	1.012	6.869
Cost per node (\$)	2.315	1.566	1.535	1.342	1.365	1.033
Power per node (W)	14,0	11,2	10,8	10,8	10,9	8,02



# Tor

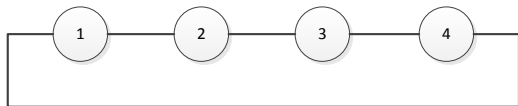


FIGURE – Topologie Tor : 4-ary 1-cube

# Discussion sur la topologie k-ary n-cube

- ▶  $k$  = nombre d'éléments par dimension
- ▶  $n$  = nombre de dimensions
- ▶ Degré :  $2n$  : 2
- ▶ Diamètre :  $n * k / 2$  : 2
- ▶ Distance Moyenne  $n * k / 4$  : 1
- ▶ Bisection :  $n * k / 4$  : 1
- ▶ Nombre de nœuds :  $N$
- ▶ Nombre de liens en fonction du nombre de nœuds :  $N$
- ▶ Bande passante : vitesse d'un seul lien,  $b$
- ▶ Bande passante totale :  $N * b$

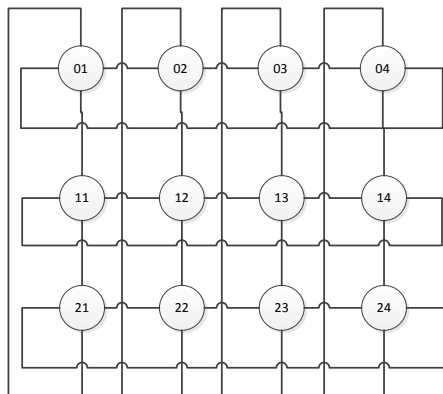


FIGURE – Topologie Tor : 4-ary 2-cube

# Discussion sur la topologie k-ary n-cube

- ▶ Degré :  $2n : 4$
- ▶ Diamètre :  $n * k / 2 : 8$
- ▶ Distance Moyenne  $n * k / 4 : 2$
- ▶ Bisection :  $n * k / 4 : 2$
- ▶ Nombre de nœuds :  $N$
- ▶ Nombre de liens en fonction du nombre de nœuds :  $N$
- ▶ Bande passante : vitesse d'un seul lien,  $b$
- ▶ Bande passante totale :  $N * b$

# Discussion globale sur ces deux topologies

- ▶ k-ary : nombre de nœuds par dimension
- ▶ 2-cube : dimension du cube
- ▶ Path-Diversity : meilleur que le Tor classique
- ▶ Résilience : meilleur

# Hypercube

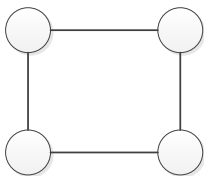


FIGURE – Hypercube : dimension 2

# Discussion sur la topologie

- ▶ Dimension :  $d$
- ▶ Diamètre :  $d = \log N$
- ▶ Nombre de nœuds :  $N = 2^d$
- ▶ Nombre de liens en fonction du nombre de nœuds :  $(N \cdot d / 2) = (N \cdot \log N) / 2$
- ▶ Bande passante : vitesse d'un seul lien,  $L$
- ▶ Bande passante totale :  $L \cdot (N \cdot \log N) / 2$
- ▶ Bisection :  $N/2$
- ▶ Distance moyenne :  $N$
- ▶ Bisection :  $N/2$

# Hypercube

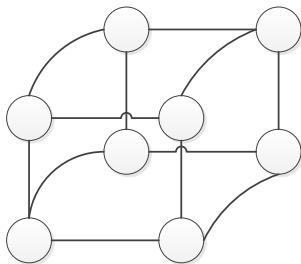


FIGURE – Hypercube : dimension 3



# Discussion sur la topologie

- ▶ Path-Diversity : assez faible
- ▶ Résilience : assez faible

# Hypercube

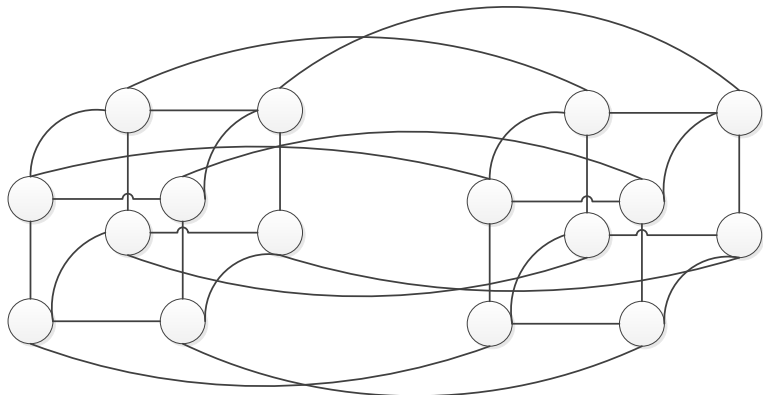


FIGURE – Hypercube : dimension 4

# Propriétés de l'hypercube

- ▶ Dimension  $N$
- ▶ Nombre de nœuds :  $2^N$
- ▶ Nombre de liens par nœud ;  $N$
- ▶ Chemin le plus long :  $N$
- ▶ Pas dessinable au delà de 4.

# Discussion sur la topologie

- ▶ Path-Diversity : bonne
- ▶ Résilience : bonne

# Dragonfly 1/2

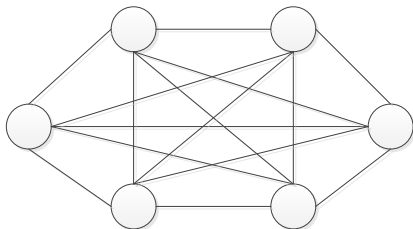
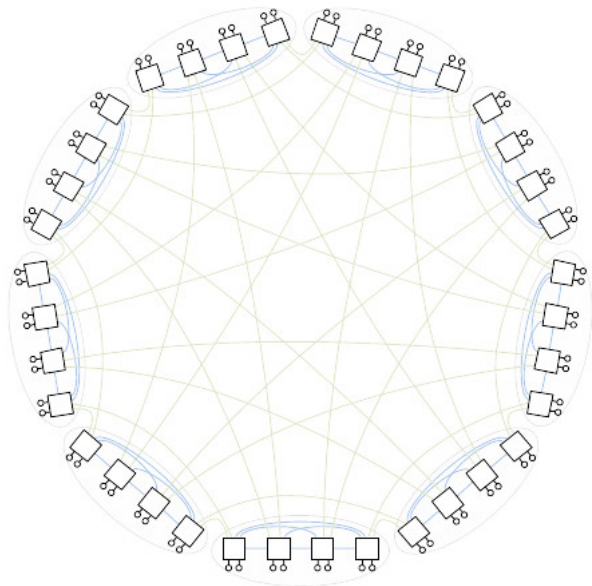


FIGURE – DragonFly : îlot

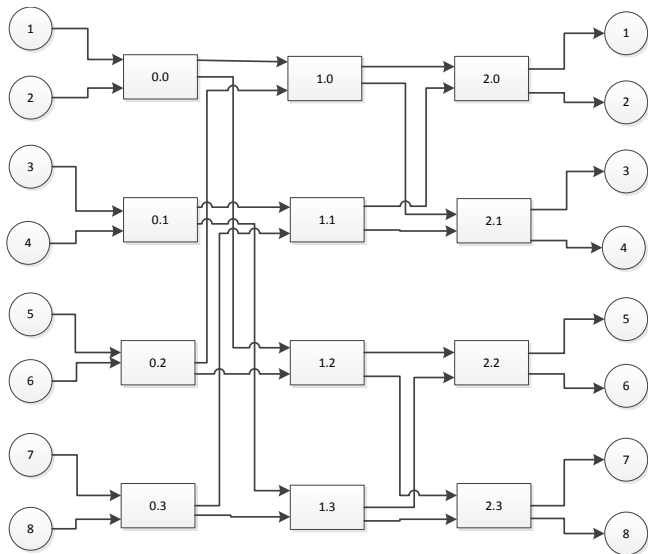
## Dragonfly 2/2



# Discussion sur la topologie

- ▶ Les îlots peuvent avoir une topologie "spécifique" : fat-tree, tor, etc.
- ▶ Path-Diversity
- ▶ Résilience
- ▶ Topologie établie et utilisée par Cray
- ▶ Difficile de données des métriques précises
  - ▶ Un réseau par  $(a,p,h)$  :  $a$ =nombre de routeurs,  $p$ =nombre de nœuds par routeur,  $h$ =nombre de canaux globaux, Balanced :  $a=2p=2h$
  - ▶ Nombre de nœuds :  $(a * p)(a * h + 1)$
  - ▶ Radix des routeur :  $p+a+h-1$
  - ▶  $K' = a*(p+h)$  : effective radix of groups

# Butterfly 2-ary 3-fly





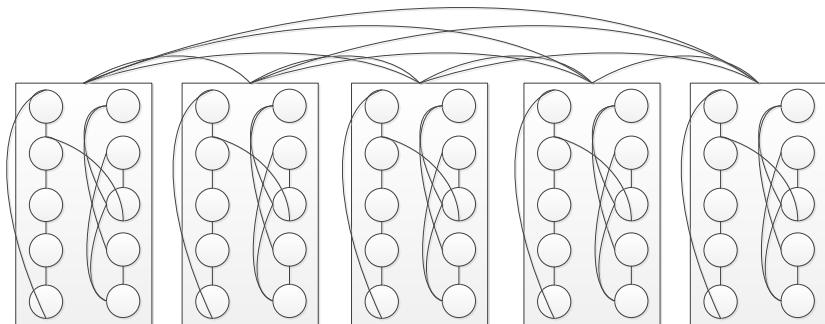
## Propriété du butterfly : k-ary n-fly

- ▶ Nombre de "stage" :  $n$
- ▶ Nombre de nœuds :  $k^n$
- ▶ Degré :  $k$
- ▶ Diamètre :  $n+1$
- ▶ Bisection :  $k^n/4$
- ▶ Hop Count :  $n+1$
- ▶ Aucun Path diversity

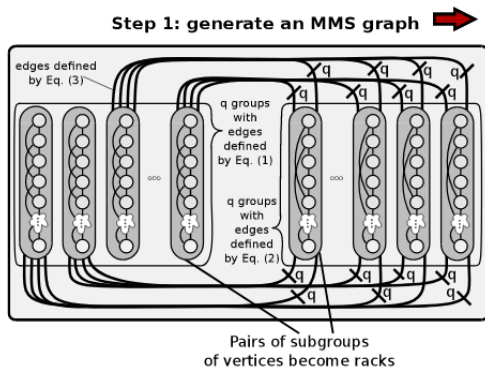
# Discussion sur la topologie

- ▶ Path-Diversity : inexistant
- ▶ Résilience : inexistant

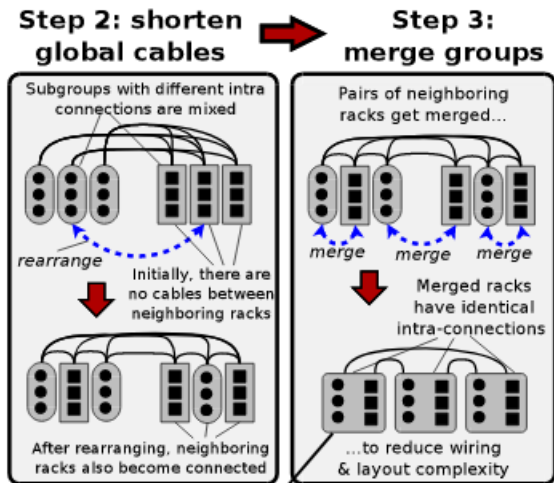
# SlimFly



# SlimFly : construction

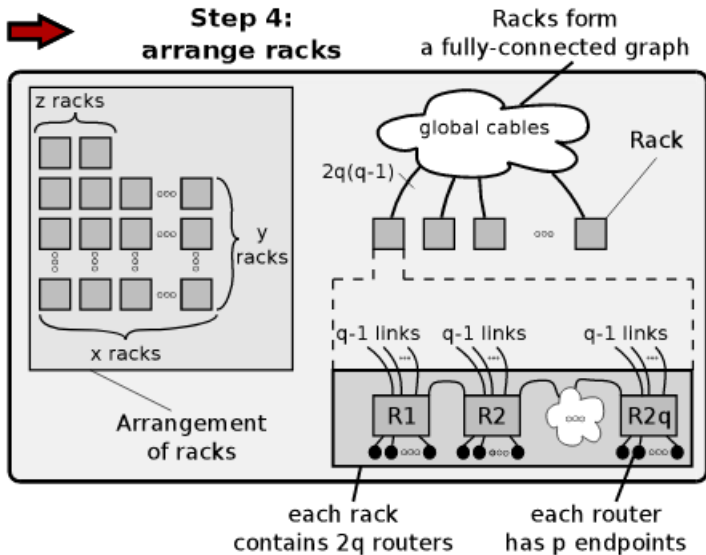


# SlimFly : construction



After merging, racks form  
an easy-to-deploy, fully-connected graph

# SlimFly : construction



# Fat-Tree

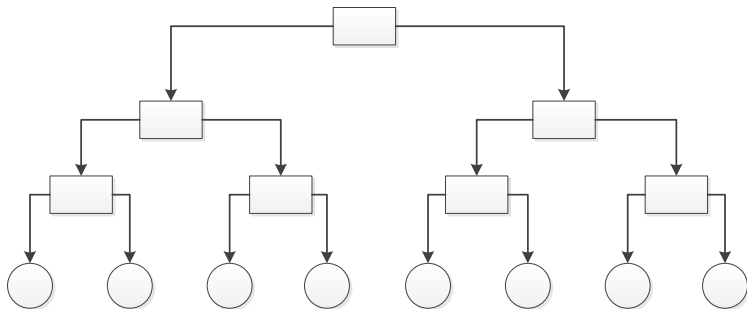


FIGURE – Topologie Fat-Tree 1

# Propriétés des arbres

- ▶  $k$  = profondeur de l'arbre
- ▶ Nombre de nœuds  $N = 2^k - 1$
- ▶ Diamètre  $2 * k - 2 \equiv 2 \log N$
- ▶ Bande passante :  $L$
- ▶ Nombre de liens en fonction du nombre de nœuds :  $3 * N - 1$
- ▶ Bande passante totale :  $L * (3 * N - 1)$



# Discussion sur la topologie

- ▶ Path-Diversity : faible
- ▶ Résilience : faible
- ▶ Inutilisable dans la vraie vie car le radix du nœud root doit être très élevé
- ▶ Très faible en cas d'échec du nœud root

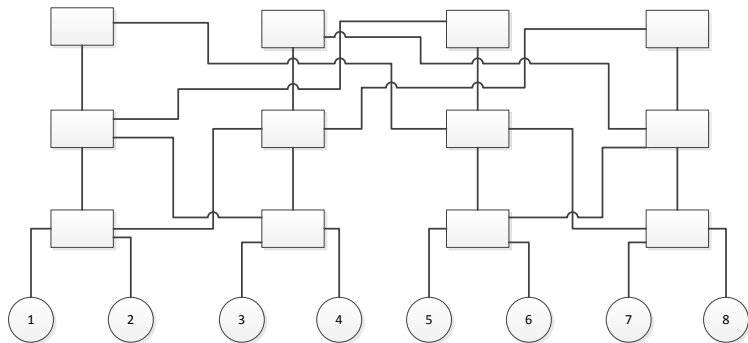


FIGURE – Topologie Fat-Tree 2

# Discussion sur la topologie

- ▶ Path-Diversity : meilleur
- ▶ Résilience : meilleur

# Discussion sur k-ary n-tree

- ▶ Nombre de nœuds :  $k^n$
- ▶ Nombre de switches :  $n * k^{n-1}$

# Comparaison des topologies

- ▶ Tableaux extrait de [Duato et al., 2002] : Diamètre pour la comparaison
- ▶ T3D : Tor 3D :  $3/2\sqrt[3]{N_r}$
- ▶ T5D : Tor 5D :  $5/2\sqrt[5]{N_r}$
- ▶ HC : HyperCube :  $\log_2 N_r$
- ▶ LH-HC : Long Hop Hyper Cube : 4-6
- ▶ FT-3 : fat tree à 3 niveaux : 4
- ▶ DLN : Random Topology : 3-10
- ▶ FBF-3 : Flattened Butterfly : 3
- ▶ DF : Dragon Fly : 3
- ▶ SF : Slim Fly : 2

(N.B. :  $N_r$  Nombre de routeurs total)

## Low-radix topology

Topologie	T3D	T5D	HC	LH-HC
Endpoints(N)	10.648	10.648	8.192	8.192
Routers ( $N_r$ )	10.648	10.368	8.192	8.192
Radix(k)	7	11	14	19
Electric cables	31.900	50.688	32.768	53.248
Fiber cables	0	0	12.288	12.888
Cost per node (\$)	1.682	3.176	4.631	6.481
Power per node (W)	19,6	30,8	39,2	53,2

# High-radix topology 1/4

Topologie	T3D	T5D	HC	LH-HC
Endpoints(N)	10.648	10.648	8.192	8.192
Routers ( $N_r$ )	10.648	10.368	8.192	8.192
Radix(k)	7	11	14	19
Electric cables	31.900	50.688	32.768	53.248
Fiber cables	0	0	12.288	12.888
Cost per node (\$)	1.682	3.176	4.631	6.481
Power per node (W)	19,6	30,8	39,2	53,2

## High-radix topology 2/4

Topologie	FT-3	DLN	FBF-3	DF
Endpoints(N)	19.876	40.200	20.736	58.806
Routers ( $N_r$ )	2.311	4.020	1.728	5.346
Radix(k)	43	43	43	43
Electric cables	19.414	32.488	9.504	56.133
Fiber cables	40.215	33.842	20.739	29.524
Cost per node (\$)	2.346	1.743	1.570	1.438
Power per node (W)	14,0	12,04	10,8	10,9



## High-radix topology 3/4

Topologie	FT-3	DLN	FBF-3	DF
Endpoints(N)	10.718	9.702	10.000	9.702
Routers ( $N_r$ )	1.531	1.386	1.000	1.386
Radix(k)	35	28	33	27
Electric cables	7.350	6.837	4.500	9.009
Fiber cables	24.806	7.716	10.000	4.900
Cost per node (\$)	2.315	1.566	1.535	1.342
Power per node (W)	14,0	11,2	10,8	10,8

## High-radix topology 4/4

Topologie	DF	SF
Endpoints(N)	10.890	10830
Routers ( $N_r$ )	990	722
Radix(k)	43	43
Electric cables	6.885	6.669
Fiber cables	1.012	6.869
Cost per node (\$)	1.365	1.033
Power per node (W)	10,9	8,02

# Synthèse des tableaux de comparaison

Topologie	T3D	T5D	HC	LH-HC	FT-3	DLN	FBF-3	DF
Enpoints(N)	10.648	10.648	8.192	8.192	19.876	40.200	20.736	58.806
Routers ( $N_R$ )	10.648	10.368	8.192	8.192	2.311	4.020	1.728	5.346
Radix(k)	7	11	14	19	43	43	43	43
Electric cables	31.900	50.688	32.768	53.248	19.414	32.488	9.504	56.133
Fiber cables	0	0	12.288	12.888	40.215	33.842	20.739	29.524
Cost per node (\$)	1.682	3.176	4.631	6.481	2.346	1.743	1.570	1.438
Power per node (W)	19,6	30,8	39,2	53,2	14,0	12,04	10,8	10,9

Topologie	FT-3	DLN	FBF-3	DF	DF	SF
Enpoints(N)	10.718	9.702	10.000	9.702	10.890	10830
Routers ( $N_R$ )	1.531	1.386	1.000	1.386	990	722
Radix(k)	35	28	33	27	43	43
Electric cables	7.350	6.837	4.500	9.009	6.885	6.669
Fiber cables	24.806	7.716	10.000	4.900	1.012	6.869
Cost per node (\$)	2.315	1.566	1.535	1.342	1.365	1.033
Power per node (W)	14,0	11,2	10,8	10,8	10,9	8,02

# Exercice 1

On souhaite interconnecter 16 nœuds grâce à une topologie de type Butterfly. Nous ne disposons que de switch ayant un radix de 4.

1. Quelle serait la meilleur **configuration** du ButterFly ?
2. Dessinez-la.
3. Quelle est le path-diversity de cette solution ? Comment pourriez-vous améliorer le path-diversity ?

## Exercice 2

En considérant la notion de **folded tor**, représentez un folded 4-ary 2-cube.

## Exercice 3

On dispose de 30 switches de 24 ports. On souhaite réaliser une topologie de type XGFT. On veut avoir le pruning suivant : entre L1 et L2 : 1 :1, entre L2 et L3 : 1 :2 pruning  
Combien peut-on brancher de nœuds ? Dessinez la représentation de cette topologie.