

Le routage dans les réseaux DTN : du cas pratique des réseaux satellitaires quasi-déterministes à la modélisation théorique

Rémi DIANA

M. Laurent Franck	Directeur de thèse
M. Emmanuel Lochin	Co-Directeur de thèse
M. Eric Fleury	Rapporteur
M. Marcelo Dias de Amorim	Rapporteur
M. Patrick Gélard	Examineur
M. Fabrice Arnal	Examineur
M. Cédric Baudoin	Invité
M. Emmanuel Dubois	Invité

6 Décembre 2012

- 1 Contexte et motivations
- 2 DQN : routage DTN pour réseaux satellitaires quasi-déterministes
- 3 Modélisation dans les réseaux DTN
- 4 Conclusion

Contexte de la thèse

- ▣ Réseaux satellitaires faiblement connectés
 - Un ensemble de satellites en orbite basse (LEO)
 - Un ensemble de relais terrestres
- ▣ Applications supportées :
 - Non temps réel
 - Envois de messages
 - Transferts de fichiers
- ▣ Topologie déterministe
 - Prévisibilité temps et durée de contacts inter-éléments
- ▣ Trafic de données généré indéterministe
 - Phénomène de congestion
- Réseau quasi-déterministe

⇒ Routage pré-calculé traditionnellement utilisé sur ces topologies de réseau déterministe

① Que peut apporter la technologie DTN à ces réseaux ?

➡ Étude d'un système quasi-déterministe

➡ Développement d'un algorithme de routage DTN adapté

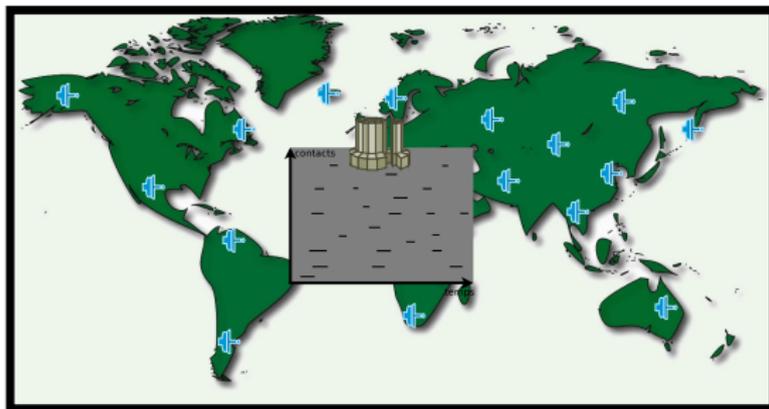
② Comment modéliser un réseau DTN hétérogène ?

- De manière théorique
- Avec un modèle générique

➡ Calcul théorique du délai d'acheminement d'un algorithme de routage DTN

Le routage pré-calculé

- ➡ Exploitation du graphe des connexions futures
- ➡ Calcul centralisé des routes optimales (métrique donnée)
- ➡ Mise à jour des tables de routage des différents éléments du réseau
- ➡ Répétition du cycle



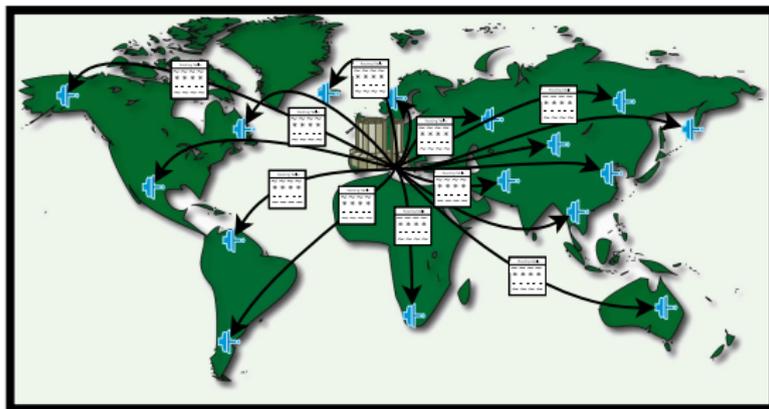
Le routage pré-calculé

- ⇒ Exploitation du graphe des connexions futures
- ⇒ Calcul centralisé des routes optimales (métrique donnée)
- ⇒ Mise à jour des tables de routage des différents éléments du réseau
- ⇒ Répétition du cycle



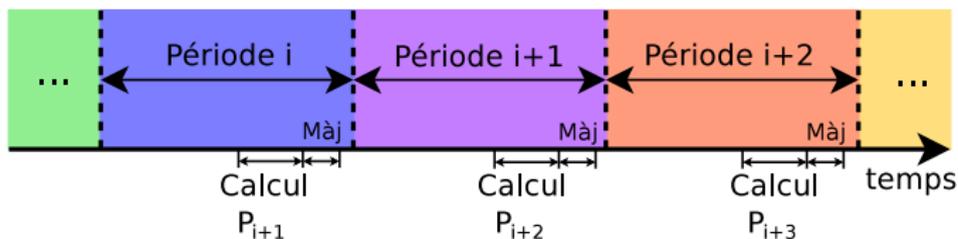
Le routage pré-calculé

- ➡ Exploitation du graphe des connexions futures
- ➡ Calcul centralisé des routes optimales (métrique donnée)
- ➡ Mise à jour des tables de routage des différents éléments du réseau
- ➡ Répétition du cycle



Le routage pré-calculé

- ➡ Exploitation du graphe des connexions futures
- ➡ Calcul centralisé des routes optimales (métrique donnée)
- ➡ Mise à jour des tables de routage des différents éléments du réseau
- ➡ Répétition du cycle



Le routage pré-calculé

Avantages

- Aucune source d'indéterminisme → optimal
- Réseaux périodiques → petit nombre de tables à calculer
- Optimisation de bout en bout

Limites

- Réseau aperiodique → calcul systématique
- Problème de résistance à l'inattendu
- Trafic non déterministe → congestion

Le routage pré-calculé

Avantages

- ➡ Aucune source d'indéterminisme → optimal
- ➡ Réseaux périodiques → petit nombre de tables à calculer
- ➡ Optimisation de bout en bout

Limites

- ➡ Réseau aperiodique → calcul systématique
- ➡ Problème de résistance à l'inattendu
- ➡ Trafic non déterministe → congestion

Notre proposition : un routage DTN à réplication

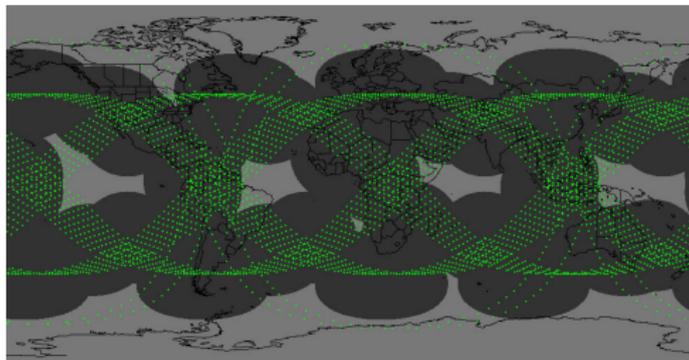
▣ Exigences d'une alternative intéressante

- Simple à déployer
- Avec des performances de délais d'acheminement proches de l'optimal
- Robuste en conditions réelles
- Minimisant le nombre de transmissions de messages (*overhead*)

- 1 Contexte et motivations
- 2 DQN : routage DTN pour réseaux satellitaires quasi-déterministes**
- 3 Modélisation dans les réseaux DTN
- 4 Conclusion

Le réseau quasi-déterministe étudié - I

- ➡ Constellation Orbcomm, 35 satellites



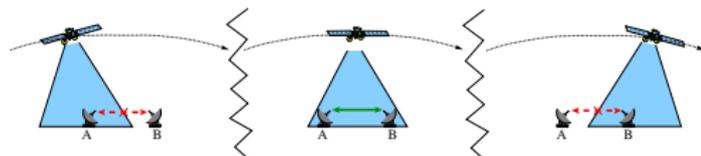
Trajectoire et zone de couverture des satellites

- ➡ La Terre est entièrement couverte
- ➡ Couverture instantanée partielle

Le réseau étudié - II

⇒ Hypothèses de contacts :

- Pas de lien inter-satellites (ISL)
- Pas de stockage dans les satellites, communication par bonds
- Deux relais sont en contact s'ils sont en visibilité mutuelle d'au moins un satellite

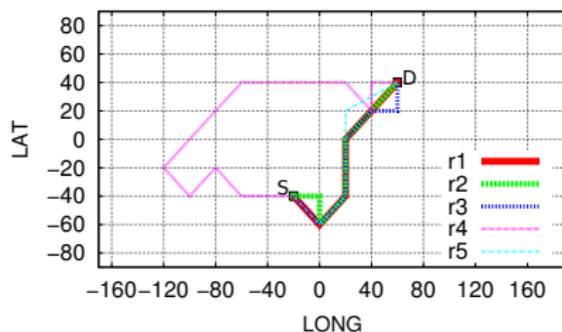
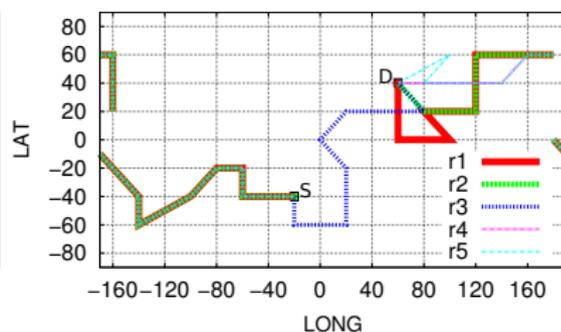


- Les sources et destinataires sont les relais terrestres

⇒ Répartition des relais terrestres :

- Homogène
- Hétérogène

Analyse de la position et forme des routes rapides

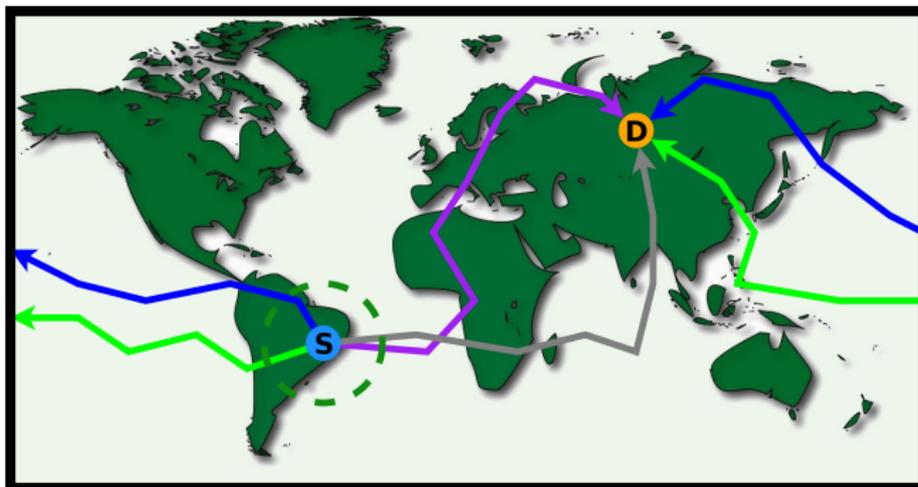
à t_0 à $t_0 + 3000s$

Position des 5 premiers groupes de routes les plus rapides à deux instants différents

Support de l'algorithme DQN - *DTN routing for Quasi-deterministic Networks*

- ➡ Formes générale des routes → routage géographique pertinent
 - Ajout de la notion de direction
 - Calcul des distances fonction de la direction
- ➡ Réplication des messages
 - Bornée : L copies. Réplication par la source uniquement
 - Équilibre de la diffusion des copies selon les directions
 - Maximise la probabilité de prendre une route rapide
- ➡ Personnalisation des concepts à notre cas d'étude
- ➡ Méthodologie générique

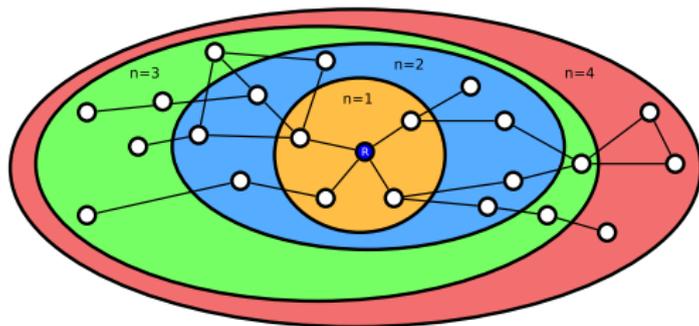
DQN - l'algorithme en image



4 copies d'un message suivant 4 routes différentes

Amélioration de l'algorithme

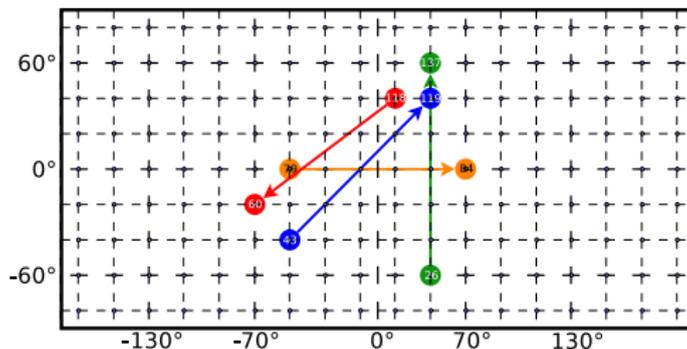
- Premières évaluations de DQN → routes rapides pas toujours capturées malgré une augmentation de L
- Les routes rapides présentent parfois des exceptions géographiques
- Prise en compte du voisinage indirect instantané lors du choix du relais suivant



Observations rejoignant des travaux du LIP6 menés par T. Phenau

Évaluations de DQN

- Répartition homogène des relais (20° en long. et lat.)
- Simulations dans the ONE
- Envoi de messages puis calcul du délai d'acheminement et de l'*overhead* moyen
- Plusieurs paires source/destination considérées :



Résultats de DQN

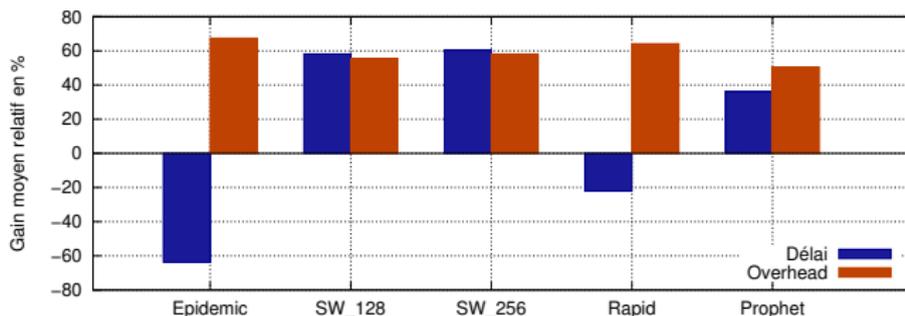
Les autres algorithmes de routages

- ➡ Épidémique → borne inférieure du délai d'acheminement
- ➡ Binary Spray and Wait → référence sur réseaux aléatoires
- ➡ Rapid → support mathématique d'optimisation
- ➡ Prophet → capable d'exploiter des schémas de contacts récurrents

Résultats de DQN

Les autres algorithmes de routages

- ➡ Épidémique → borne inférieure du délai d'acheminement
- ➡ Binary Spray and Wait → référence sur réseaux aléatoires
- ➡ Rapid → support mathématique d'optimisation
- ➡ Prophet → capable d'exploiter des schémas de contacts récurrents



Répartition réaliste des relais terrestres

Nouvelles répartition

- 33 relais terrestres
- A proximité de grandes villes du monde
- 5 paires source/destination considérées :

Répartition réaliste des relais terrestres

Nouvelles répartition

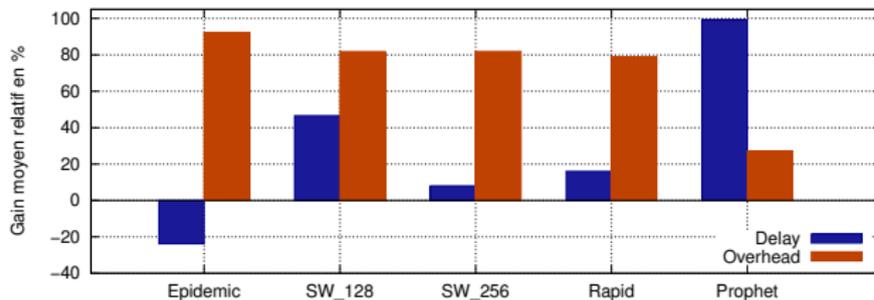
- 33 relais terrestres
- A proximité de grandes villes du monde
- 5 paires source/destination considérées :



Répartition réaliste des relais terrestres

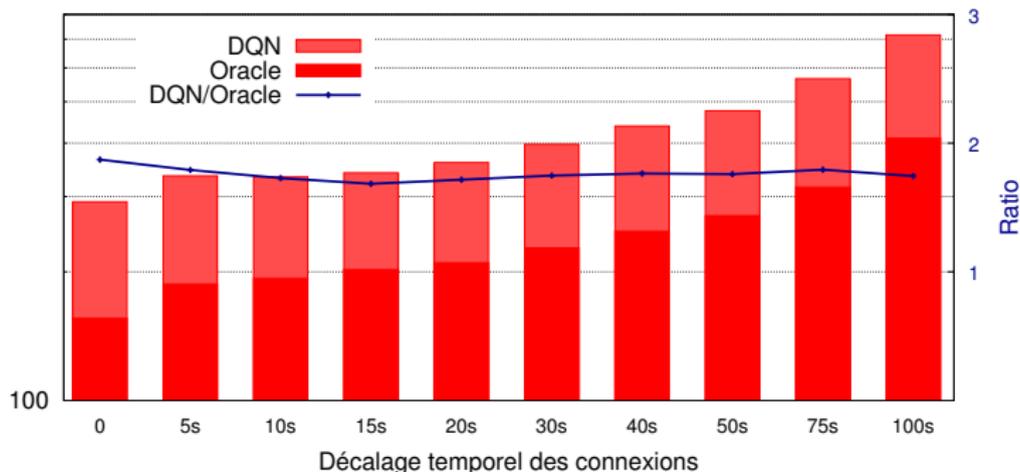
Nouvelles répartition

- 33 relais terrestres
- A proximité de grandes villes du monde
- 5 paires source/destination considérées :



Évaluations de DQN sur réseaux chargés

- Simulation d'une charge variable dans le réseau
- Charge → indisponibilité de certaines connexions
- Probabilité d'indisponibilité des connexions fonction de leurs durées
- Raccourcissement des durées de connexion



Bilan

- Proposition de DQN comme réponse à la problématique initiale
- Solution spécifique au système étudié
- Mais, méthodologie d'analyse et de développement générique

A DTN routing scheme for LEO satellites topology

IEEE VTC fall 2012

Version étendue soumise à une revue internationale

- 1 Contexte et motivations
- 2 DQN : routage DTN pour réseaux satellitaires quasi-déterministes
- 3 Modélisation dans les réseaux DTN**
- 4 Conclusion

Contexte de l'étude

⇒ un réseau DTN considéré comme :

- Un ensemble de nœuds
- Connectés de manière intermittente
- Interconnexion des nœuds régie par des lois probabilistes

⇒ Modèle générique

⇒ Réseau homogène

- Paramètres de loi identiques pour tous les couples de nœuds
- Tous les nœuds se rencontrent

⇒ Réseau hétérogène

- Paramètres de loi fonction du couple de nœuds considéré
- Tous les nœuds ne se rencontrent pas nécessairement

Travaux existants

- ➡ Modélisation markovienne (réseau λ)
- ➡ Modélisation du routage épidémique, routage à deux sauts
- ➡ Quelques axes particuliers comme l'énergie
- ➡ Aucun travaux abordant la modélisation hétérogène

Quoi ? Pourquoi ? Comment ?

- ➊ Appréhender les réseaux hétérogènes
 - ➋ Modéliser la dissémination des messages du routage BSW
- ➡ Protocole de routage de référence
 - Un des premiers routages efficaces du DTN
 - Optimal à facteur de réplication fixé sur réseaux aléatoires
 - Très utilisé pour les comparaisons de performances
 - ➡ Utilisation d'une modélisation markovienne à temps continu
 - ➡ Théorème de temps de première atteinte

Rappel du fonctionnement de BSW

Règles de réplication

n_c : nombre de copies d'un message présent dans un nœud

➤ Phase Spray :

- Tant que $n_c > 1 \rightarrow$ transfert de $\lceil \frac{n_c}{2} \rceil$ copies lors d'un contact avec un nœud sans copie

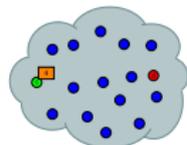
➤ Phase Wait :

- $n_c = 1$
- Conservation de la copie jusqu'à rencontrer la destination

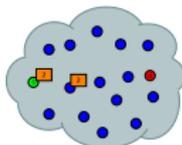
Modélisation de BSW dans le cas homogène

- Raisonnement fondé sur les différentes répartitions possibles des copies dans le réseau. $L = 2^k$ simplifie l'écriture littérale
- Une répartition $\Leftrightarrow V = (v_i)_{0 \leq i \leq k}$
 - v_i , nombre de nœuds ayant 2^i copies
- Chaîne de Markov formée des différentes répartitions possibles
- Ajout d'un état absorbant \Leftrightarrow délivrance du message
- Calcul des transitions entre états par minimum de lois exponentielles

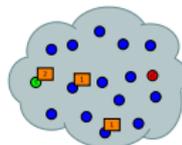
Construction de la chaîne pour $L = 4$



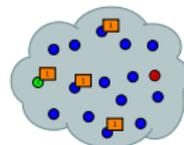
1 nœud avec 4 copies



2 nœuds avec 2 copies

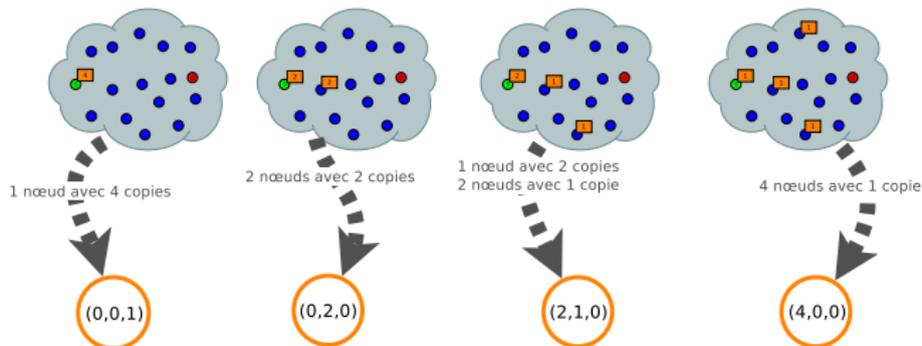


1 nœud avec 2 copies
2 nœuds avec 1 copie

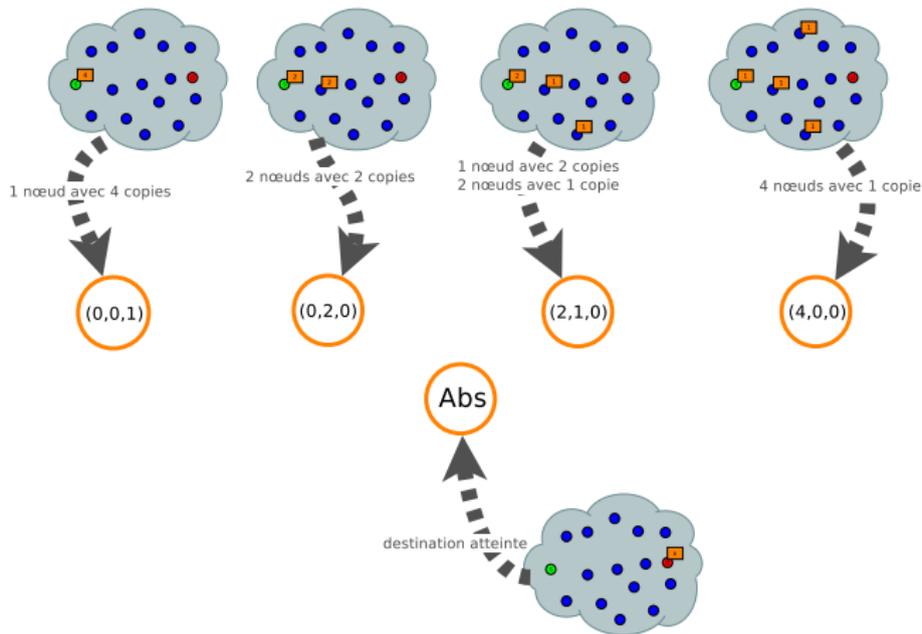


4 nœuds avec 1 copie

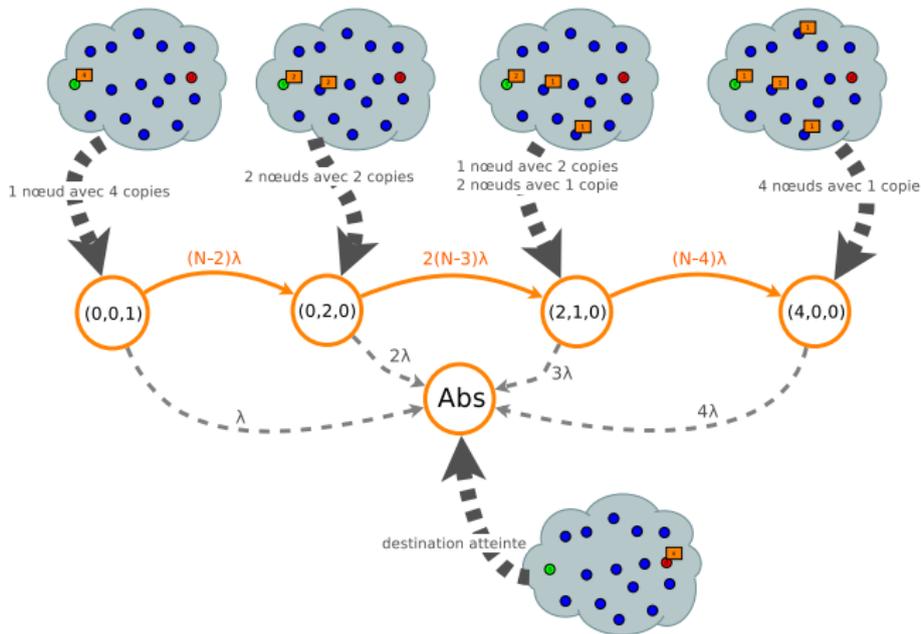
Construction de la chaîne pour $L = 4$



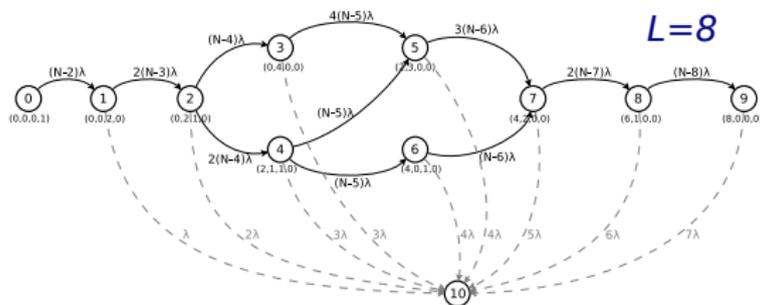
Construction de la chaîne pour $L = 4$



Construction de la chaîne pour $L = 4$



Autres exemples de chaîne et propriétés

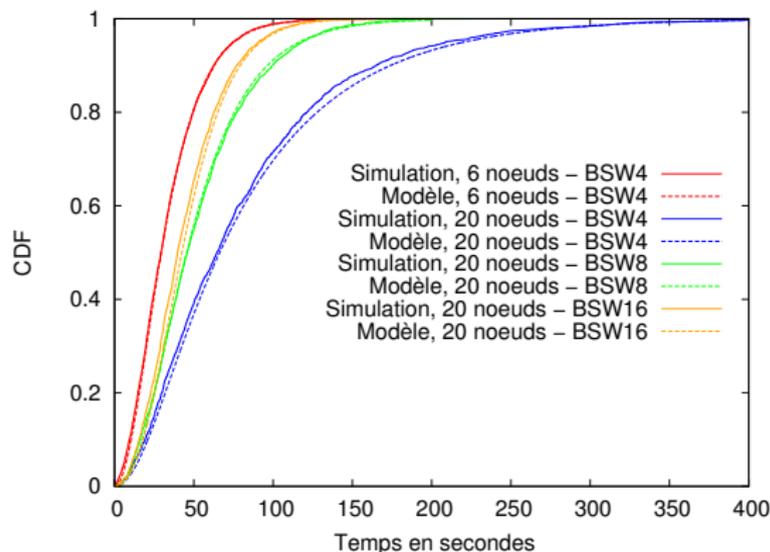


Propriétés

- ➡ Nombre d'états dans la chaîne \rightarrow nombre de partitions binaires d'un ensemble de taille 2^k
 - ➡ Suite arithmétique connue
- ➡ Croissance rapide
- ➡ Calcul littéral des lois de transitions

Simulations - paramètres et résultats

- ➔ Génération des traces de connexions à caractère exponentiel
- ➔ Envoi de messages suffisamment espacés pour être indépendants



#	L	N	$\frac{1}{\lambda}(s)$
1	4	6	50
2	4	20	200
3	8	20	200
4	16	20	200

Fonctionnement

- ➡ Raisonnement similaire : répartitions possibles des copies
- ➡ **BUT : introduire la différenciation des nœuds**
 - ➡ Représentation matricielle $M = (m_{i,j})_{0 \leq i < N, 0 \leq j \leq k}$
 - N : nombre de nœuds dans le réseau (nombre de lignes)
 - $L = 2^k$

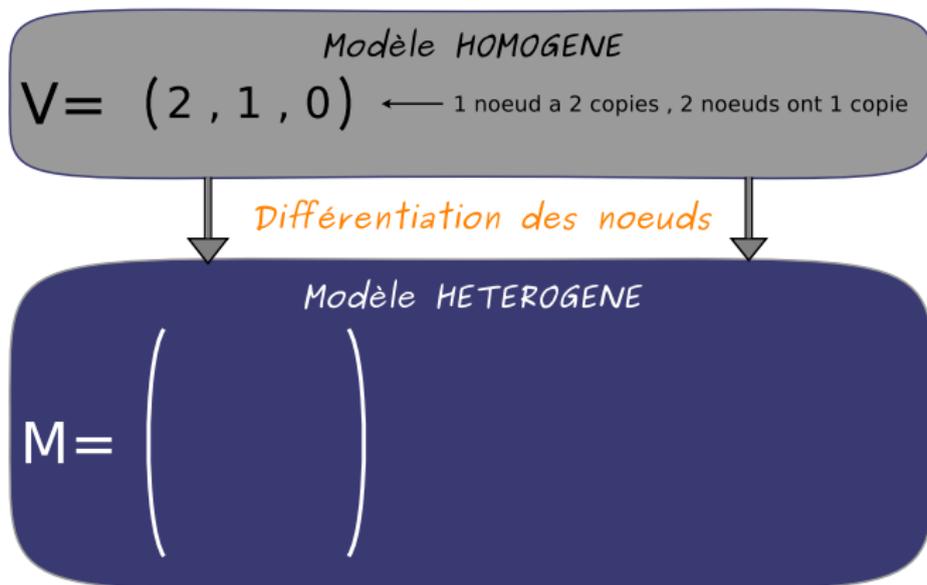
De l'homogène à l'hétérogène

Modèle HOMOGENE

$$V = (2, 1, 0) \leftarrow \text{1 noeud a 2 copies, 2 noeuds ont 1 copie}$$

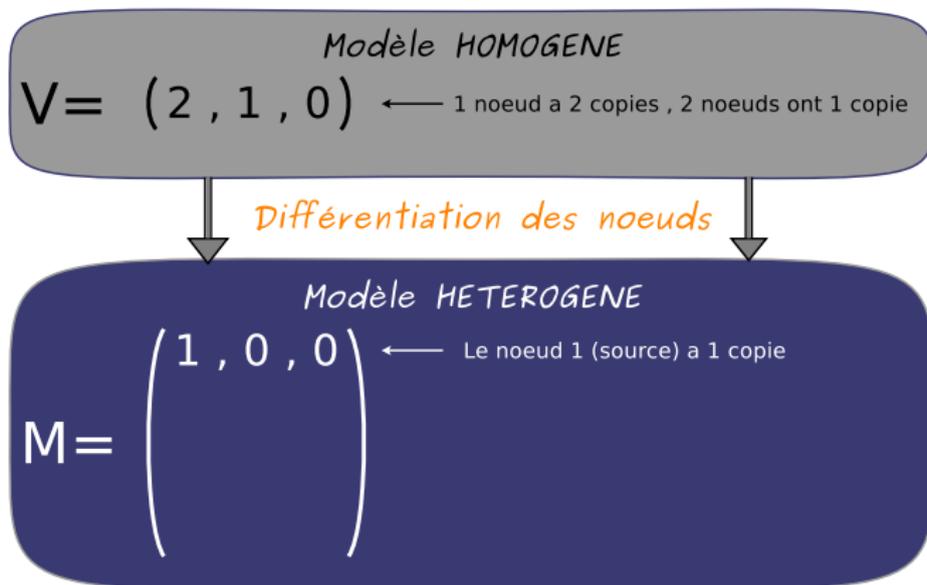
- $m_{i,j}$: valeur binaire indiquant si le noeuds i possède 2^j copies

De l'homogène à l'hétérogène



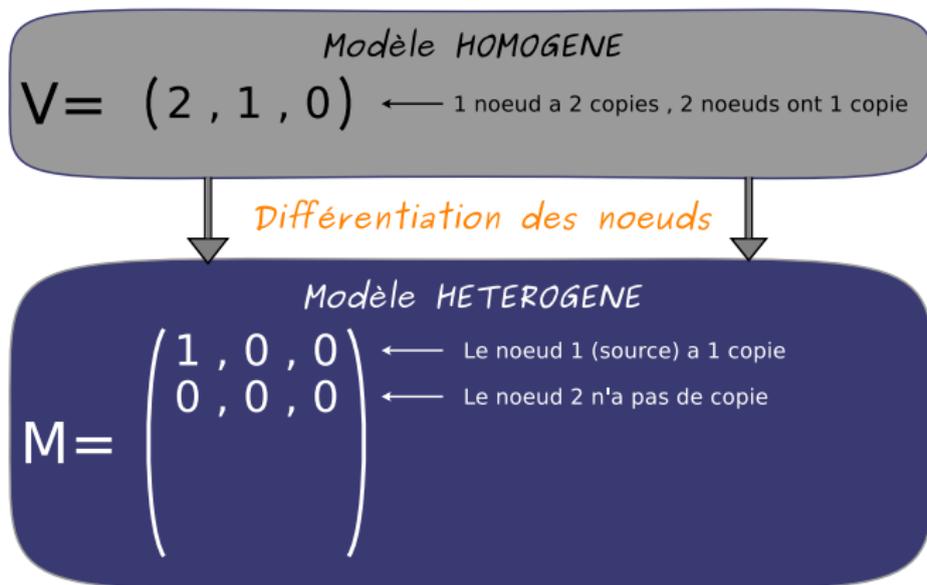
- $m_{i,j}$: valeur binaire indiquant si le noeuds i possède 2^j copies

De l'homogène à l'hétérogène



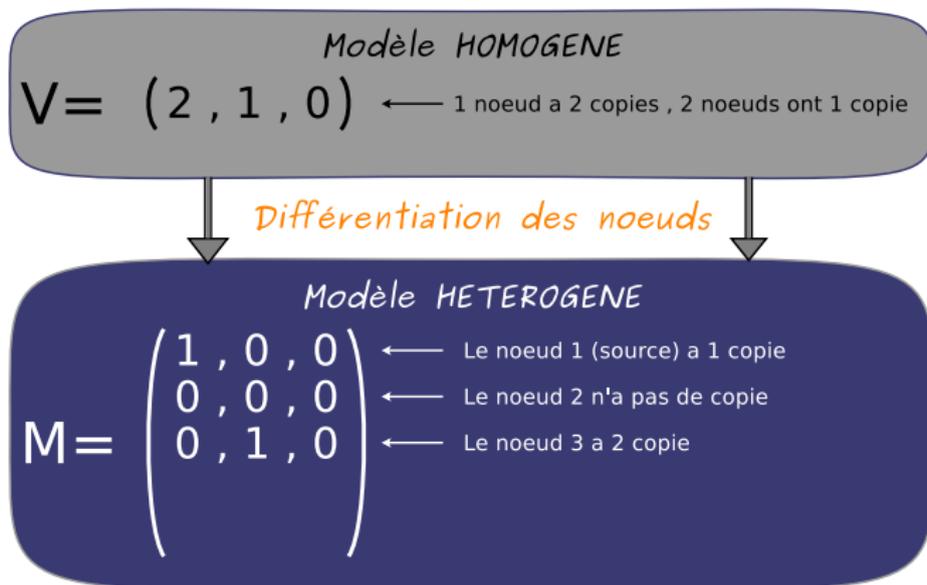
- $m_{i,j}$: valeur binaire indiquant si le noeuds i possède 2^j copies

De l'homogène à l'hétérogène



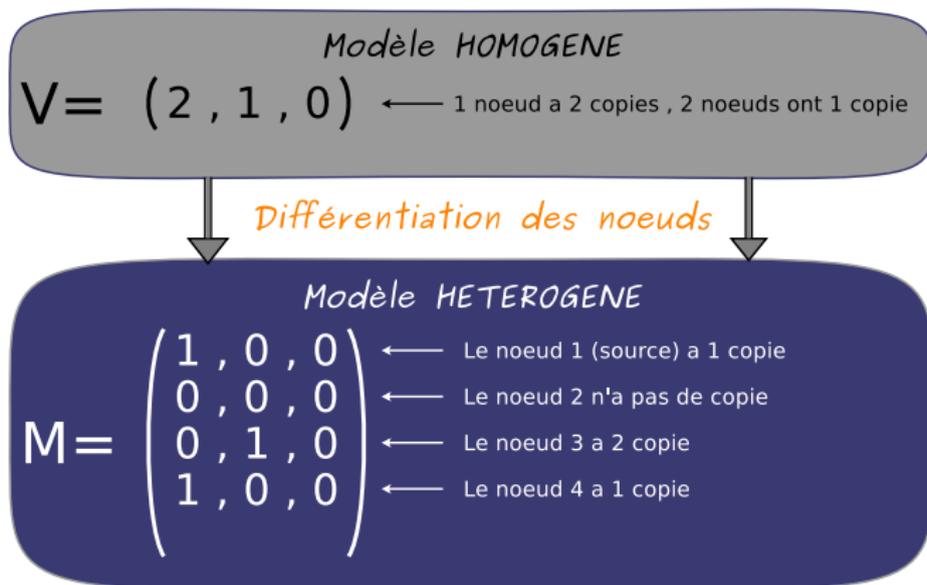
- $m_{i,j}$: valeur binaire indiquant si le noeuds i possède 2^j copies

De l'homogène à l'hétérogène



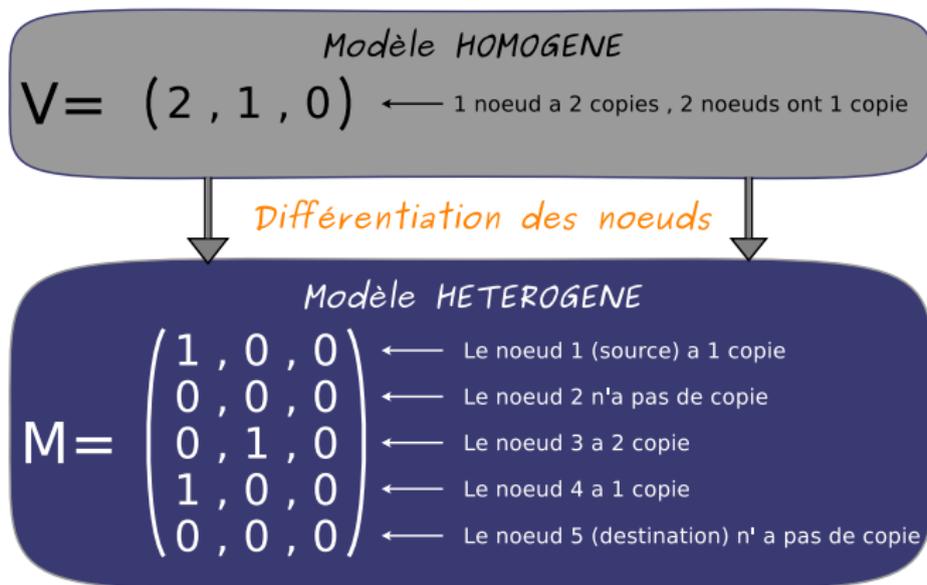
- $m_{i,j}$: valeur binaire indiquant si le noeuds i possède 2^j copies

De l'homogène à l'hétérogène



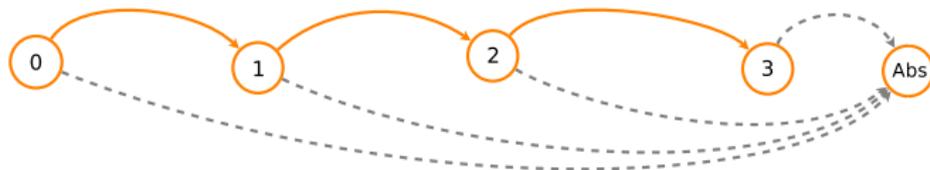
- $m_{i,j}$: valeur binaire indiquant si le noeuds i possède 2^j copies

De l'homogène à l'hétérogène

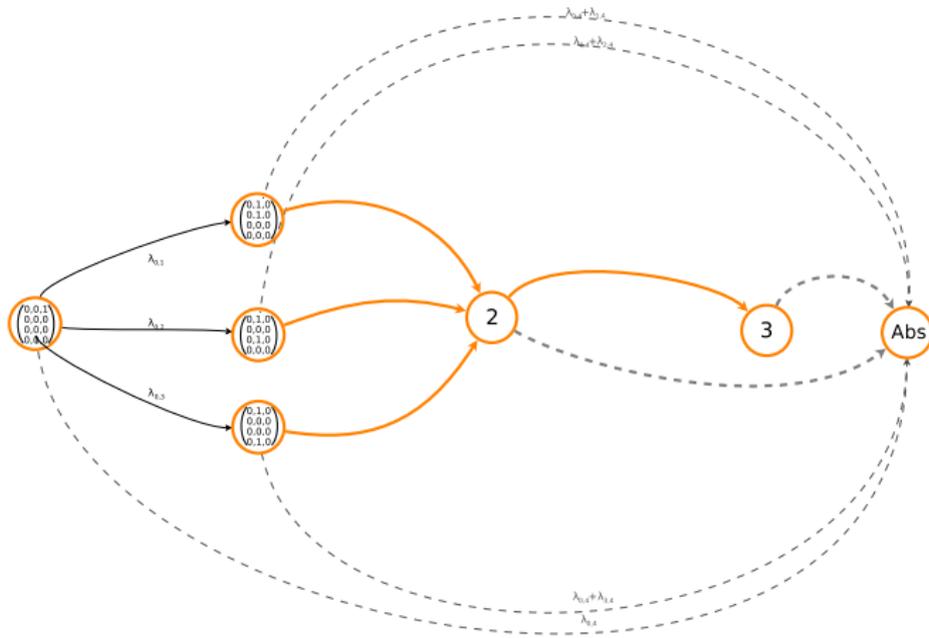


- $m_{i,j}$: valeur binaire indiquant si le noeuds i possède 2^j copies

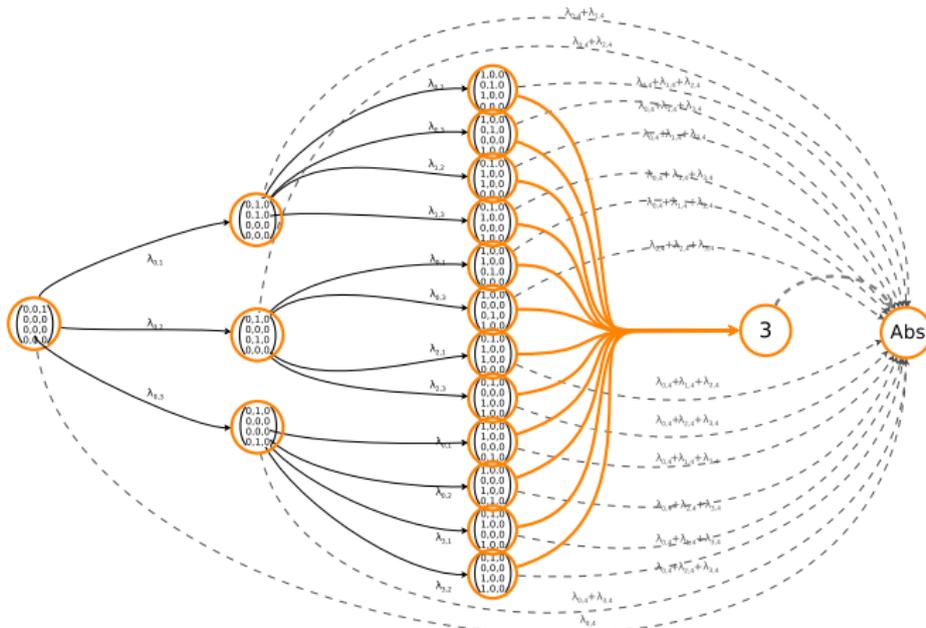
Exemple de construction de chaîne hétérogène



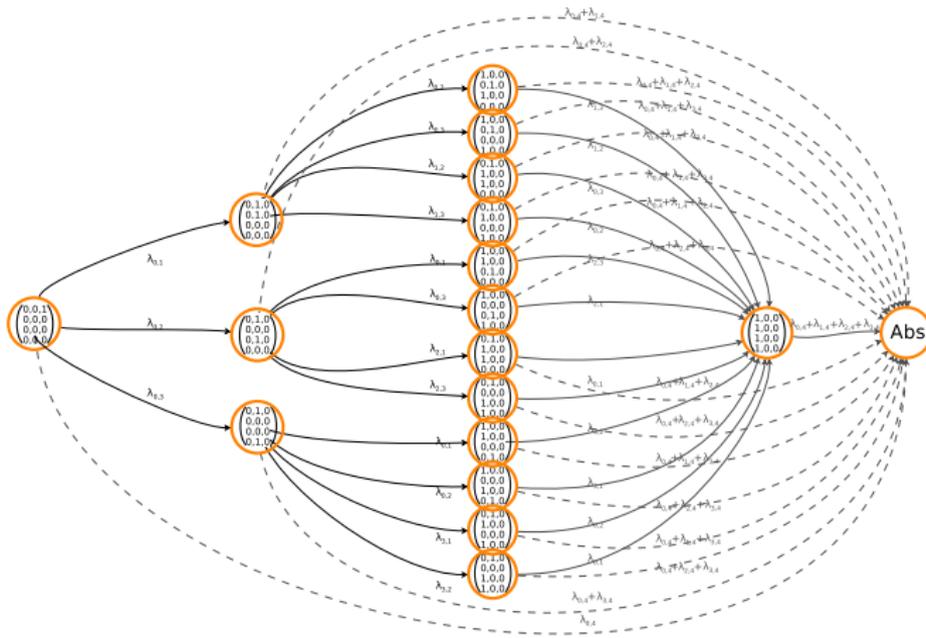
Exemple de construction de chaîne hétérogène



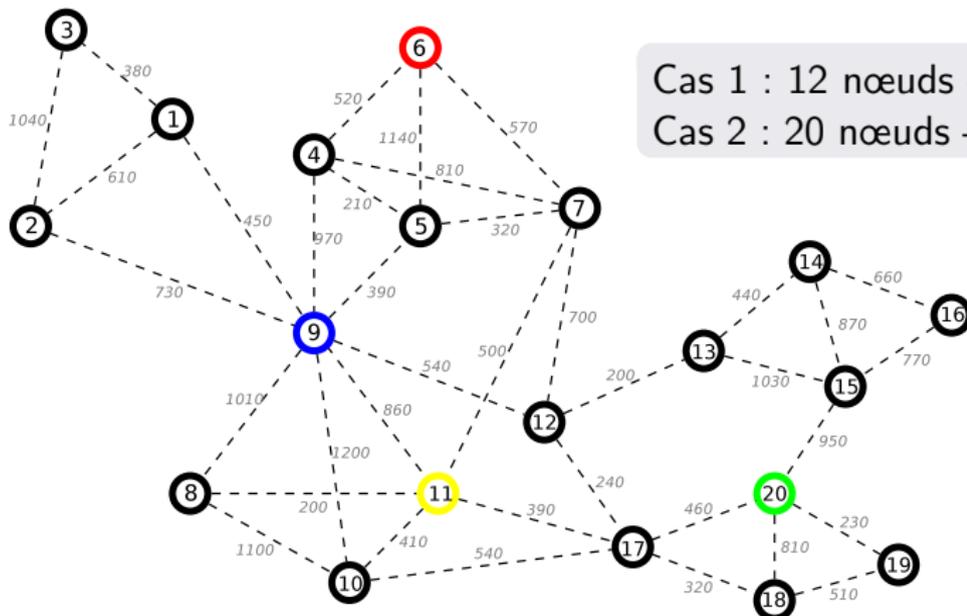
Exemple de construction de chaîne hétérogène



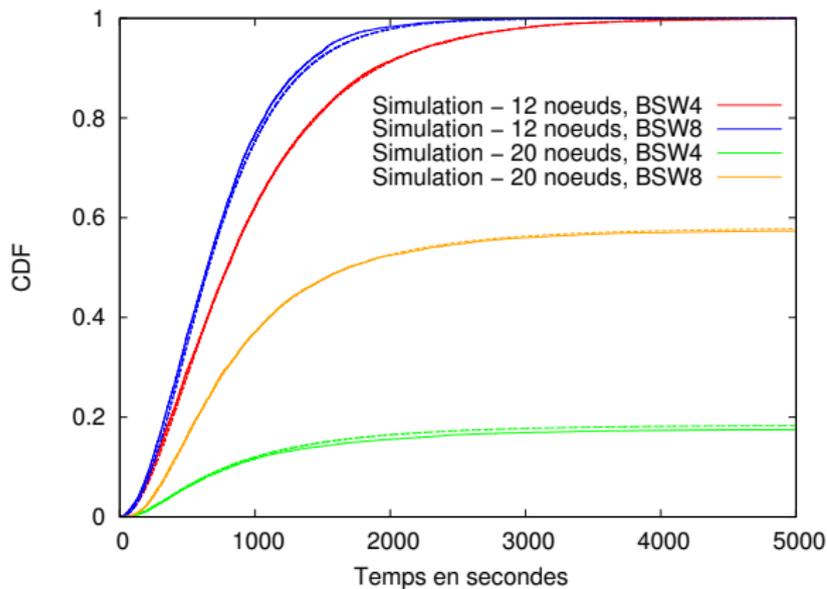
Exemple de construction de chaîne hétérogène



Simulations - topologies d'étude



Simulations - Résultats



- Modèles appréhendant tous les types de réseau
- Résultats précis
- Limites dues à la complexité du modèle

Modelling the Delay Distribution of Binary Spray and Wait Routing Protocol

IEEE Wowmom/AOC 2012

- 1 Contexte et motivations
- 2 DQN : routage DTN pour réseaux satellitaires quasi-déterministes
- 3 Modélisation dans les réseaux DTN
- 4 Conclusion

Deux axes de recherche - théorique et pratique

➤ Développement d'un algorithme de routage

- Adapté aux contraintes systèmes
- Positionné comme alternative au routage pré-calculé

➤ Extensions possibles :

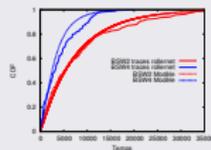
- Appliquer l'analyse à une autre constellation
- Ajouter le stockage dans les satellites

➤ Modélisation complète et précise du BSW

- Applicable à tous les réseaux " λ "
- Modèle proche en conditions réelles

➤ Extensions possibles :

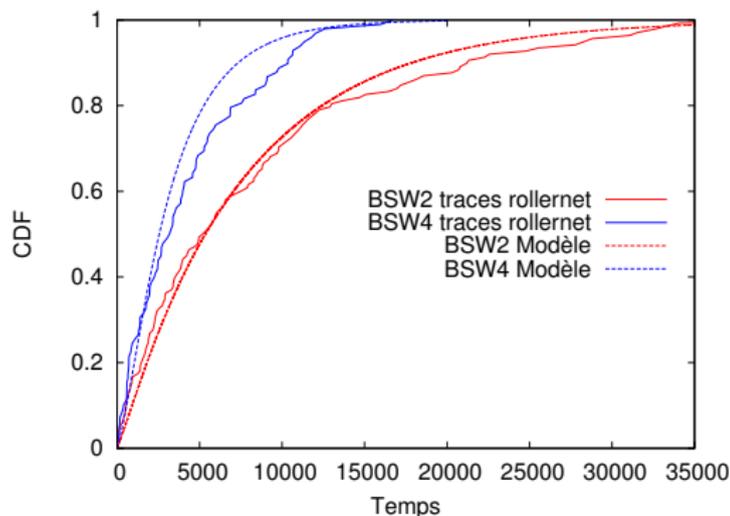
- Simplification de la complexité : modèle approximé
- Analyse de l'occupation du réseau





Annexes - Rollernet

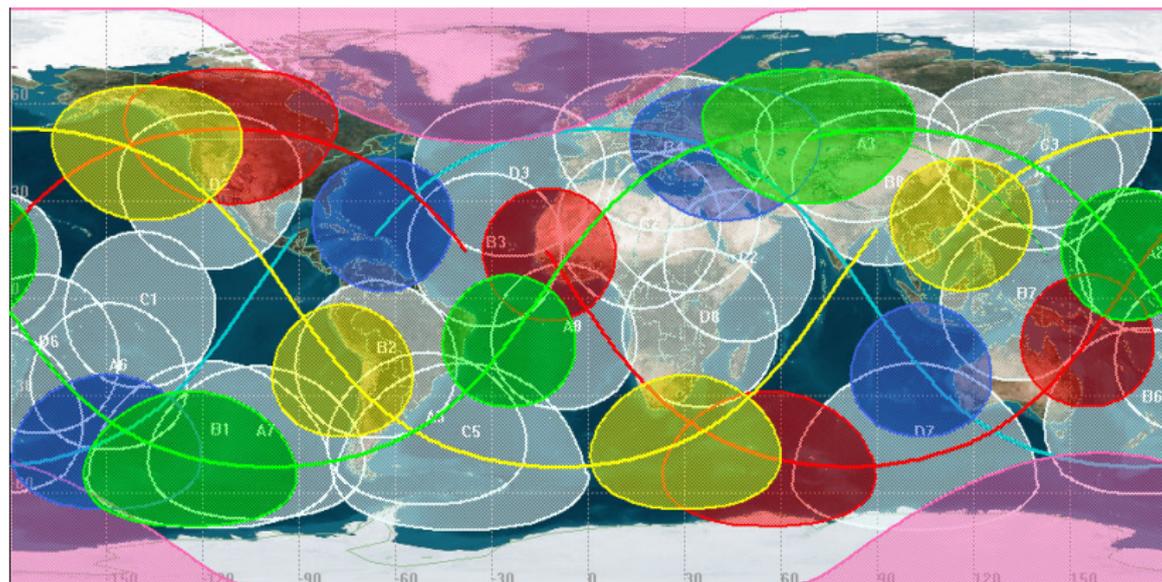
- ➡ Différents groupes de gens
- ➡ Considération de 11 nœuds correspondant à un groupe d'amis
- ➡ Approximation des lois d'inter-contacts par des lois λ



Le système Orbocmm réel - cf site web

- ▣▣▣▣ Mêmes constellation
- ▣▣▣▣ Réseau complété par réseau GSM (Tier-1 GSM et CDMA) qui constitue le backbone du réseau
- ▣▣▣▣ 15 relais terrestres - 1 centre de contrôle de la constellation et un centre de contrôle des relais
- ▣▣▣▣ Assure une communication partout sur Terre (→ buffers dans les satellites) et de délais faibles
- ▣▣▣▣ Approche très différente de la notre

Le système Orbocmm réel - cf site web



Routage Prophet

- ➡ *Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity*
- ➡ Utilise la métrique "probabilité de délivrance"
- ➡ 4 Paramètres
 - α : paramètre de lissage des prédictions de délivrance
 - β : poids de la propriété de transitivité
 - γ : gère l'évolution temporelle de la prédiction de délivrance
 - δ : gère le maximum de la probabilité de délivrance entre 2 nœuds
- ➡ Sensibilité des performances aux paramètres

CGR - *Contact Graph Routing*

- ▣ Routage se basant sur le planning des futurs contacts
- ▣ Développé pour des environnements déterministes
- ▣ N'adresse volontairement pas les problèmes liés aux phénomènes indéterministes
- ▣ Phénomènes traités par une optimisation architecturale du système
- ▣ Contexte d'application fondamentalement différent du notre

Disponibilité spatio-temporelle de notre cas d'étude

