



# **Modélisation stochastique et simulation des réseaux sans fil multi-sauts**

**Guillaume Chelius**

Laboratoire LIP - ENS Lyon

Equipe D-NET - INRIA

**En collaboration avec :**

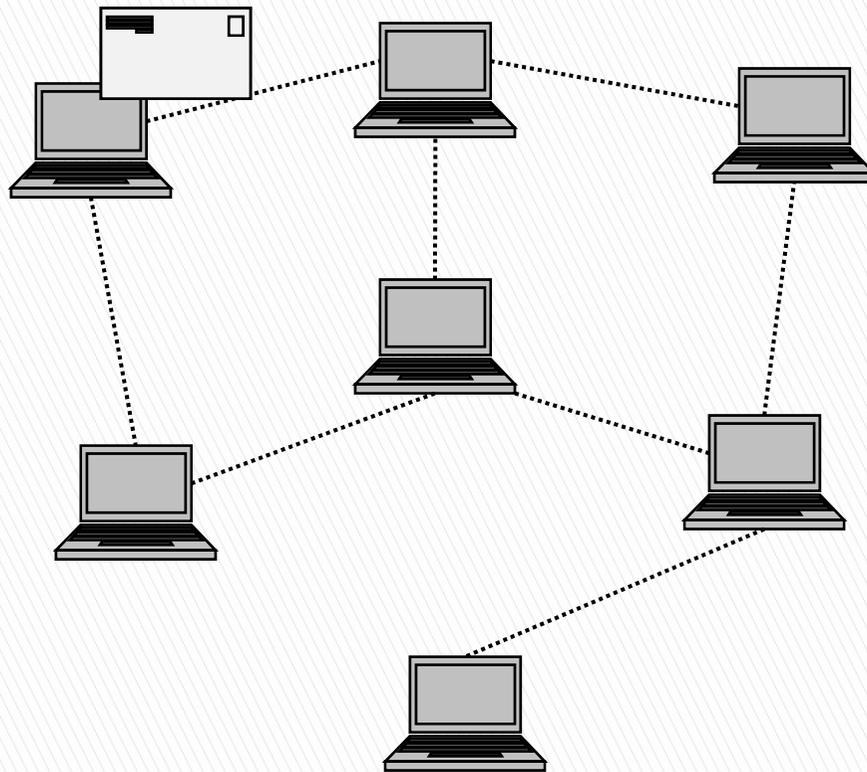
Elyes Ben Hamida, PostDoc CEA

# Plan

- ▶ **Contexte général**
  - Les réseaux sans fil multi-sauts
  - Problématique de l'évaluation des protocoles
- ▶ **Le lien radio**
- ▶ **La simulation**
- ▶ **Cas d'étude et contributions**
  - Découverte de voisinage : impact de la couche PHY
  - Dissémination dans les réseaux de capteurs avec puits mobiles : impact des paramètres
- ▶ **Conclusions et perspectives**

# Contexte général

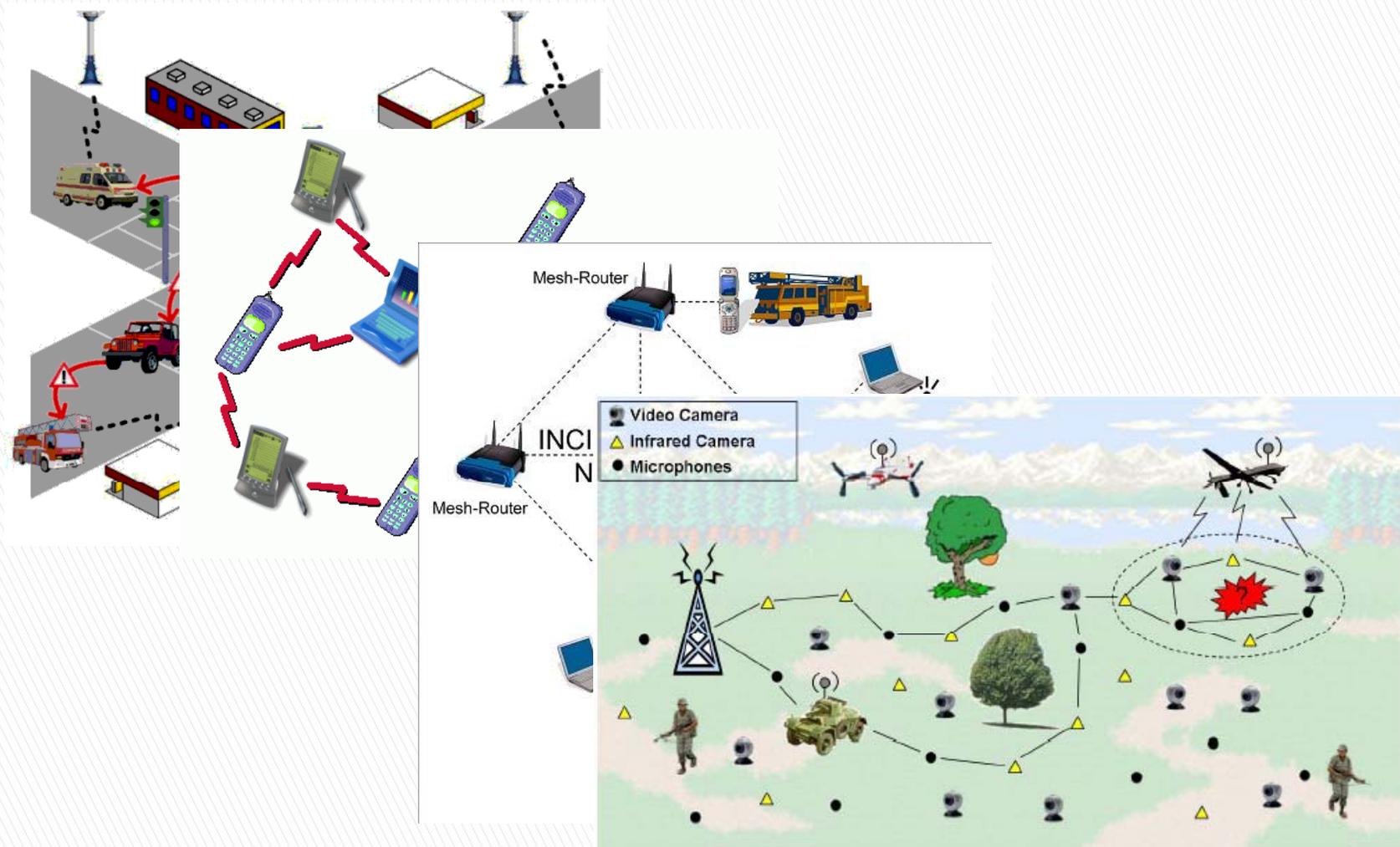
## Les réseaux sans fil multi-sauts :



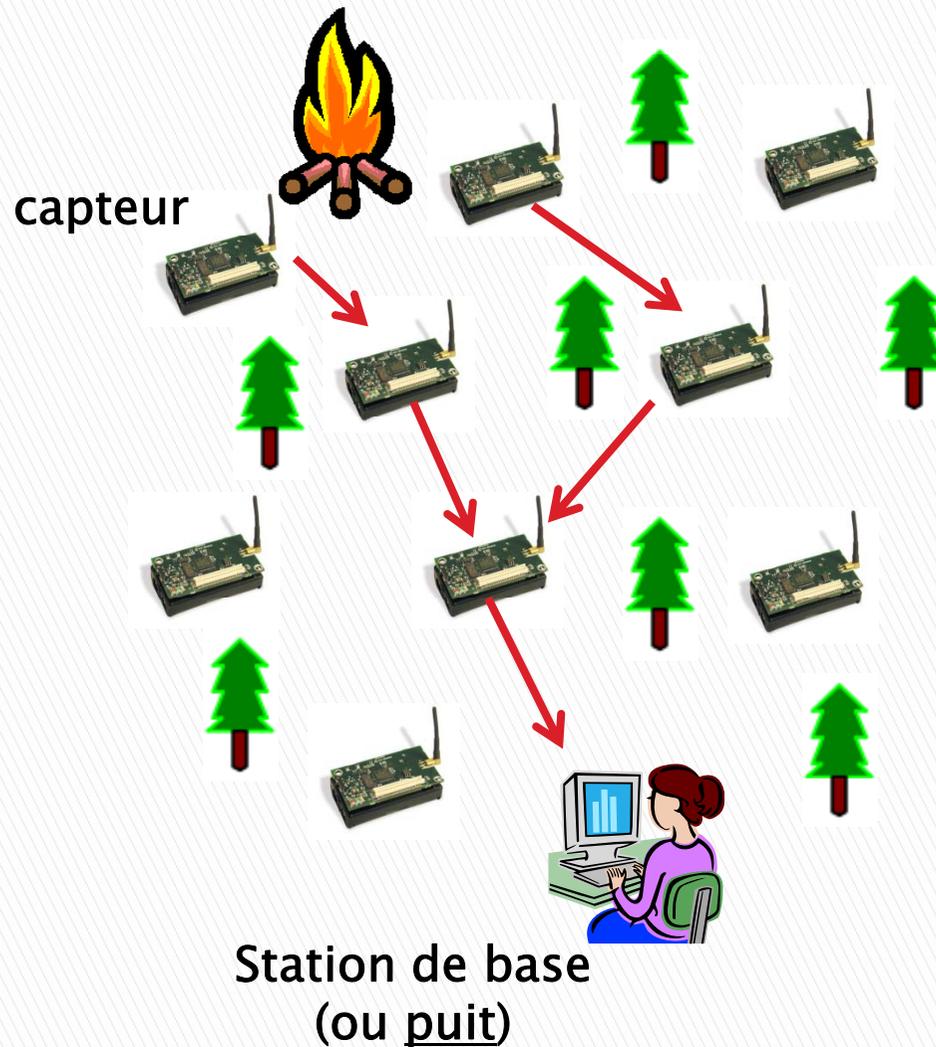
Terminaux sans fil  
Radio / portée limitée  
Communication multi-sauts  
➤ Notion de routage

Réseaux autonomes et spontanés  
➤ Pas d'infrastructure centralisée  
➤ Algorithmes, protocoles et applications distribués

# Applications



# Les réseaux de capteurs



Les réseaux de capteurs :

- Ressources limitées
- Communication N-vers-1
- Dissémination vers le puit

Le puits :

- Unité riche en ressources
- Passerelle entre les capteurs et l'utilisateur final

Applications :

- Détection d'intrusion/événement
- Surveillance météorologique
- etc.

# Problématique

## Les réseaux de capteurs



### Motivations :

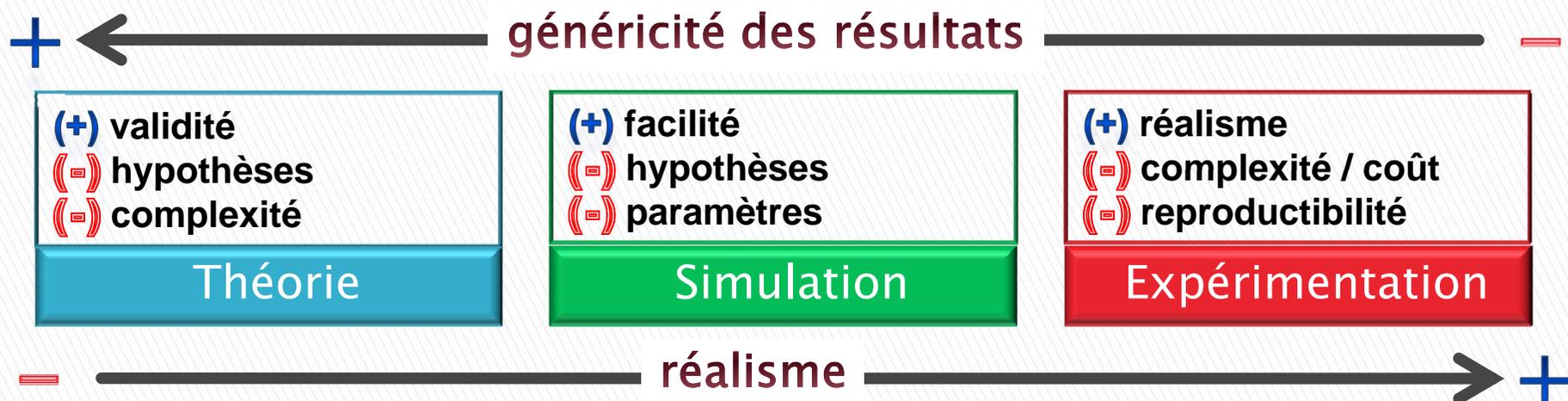
- **Evaluation des réseaux sans fil multi-sauts :**
  - Quels sont les performances des protocoles ?
  - Quels sont les paramètres à optimiser ?
  - Comment dimensionner ces paramètres ?
- **Pas évident car :**
  - Protocoles distribués et communication multi-sauts
  - Contraintes : énergie, QOS, passage à l'échelle, etc.
  - **Lien radio non déterministe !**

# Evaluation des réseaux sans fil multi-sauts

## Les réseaux de capteurs



## Trois méthodologies l'évaluation des performances :

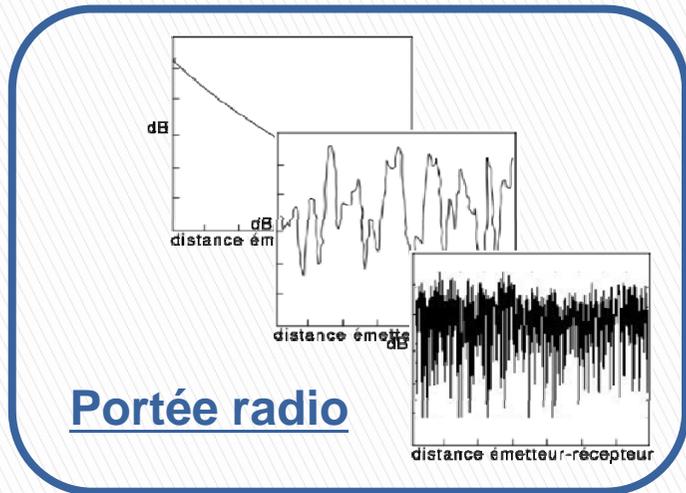
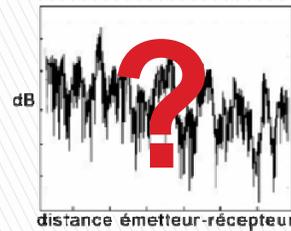
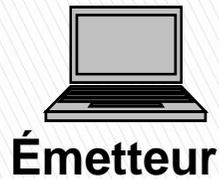


# Plan

- ▶ **Contexte général**
  - Les réseaux sans fil multi-sauts
  - Problématique de l'évaluation des protocoles
- ▶ **Le lien radio**
- ▶ **La simulation**
- ▶ **Cas d'étude et contributions**
  - Découverte de voisinage : impact de la couche PHY
  - Dissémination dans les réseaux de capteurs avec puits mobiles : impact des paramètres
- ▶ **Conclusions et perspectives**

# Modélisation du canal radio

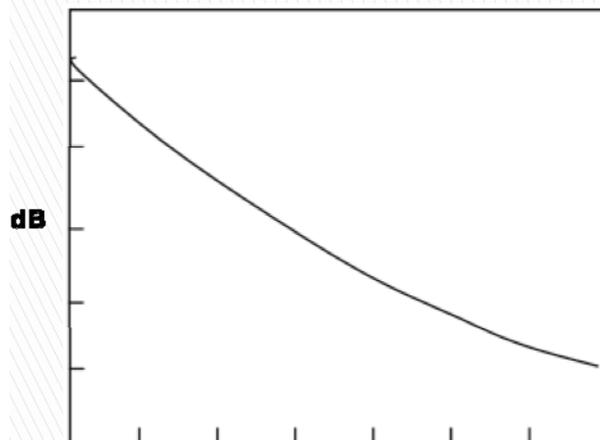
Lorsque j'émet, quel SNR sera reçu ?



# Modélisation de la portée radio

## pathloss

(atténuation fct. de la distance)

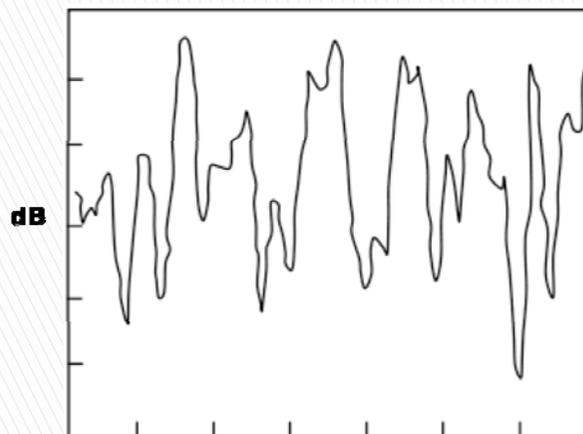


Distance emitter-receiver

*Ex* : freespace, two-ray

## shadowing

(fluctuations dues aux obstacles)

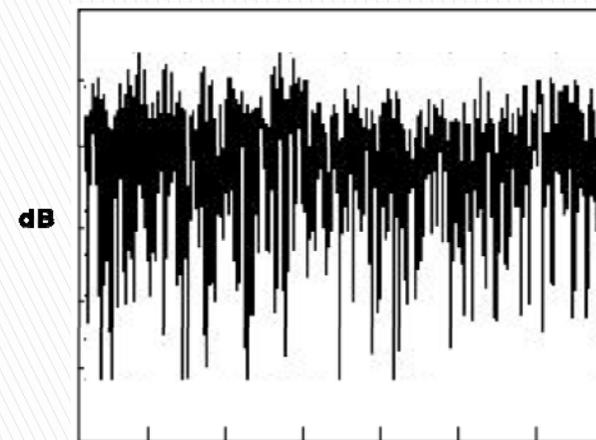


Distance emitter-receiver

*Ex* : log-normal

## fading

(fluctuations rapides dues aux multi-trajets)

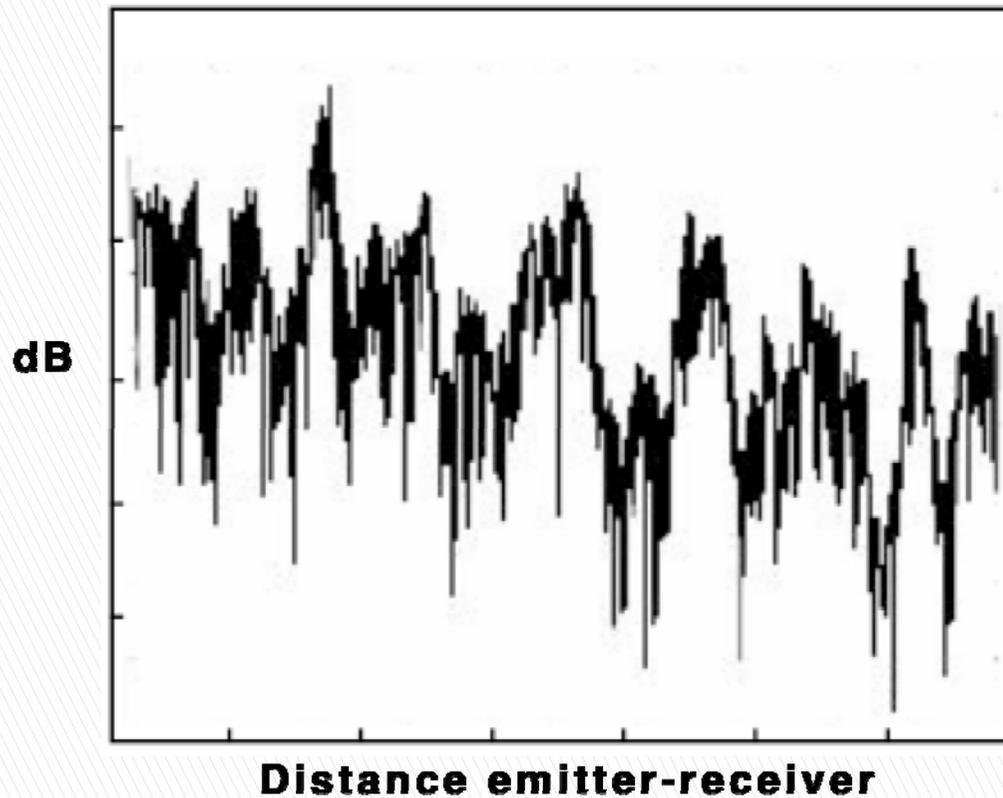


Distance emitter-receiver

*Ex* : rician, Rayleigh

# Modélisation du lien radio

pathloss + shadowing + fading



La notion de lien radio est basée sur la définition d'un seuil de *SNR* (*signal to noise ratio*).

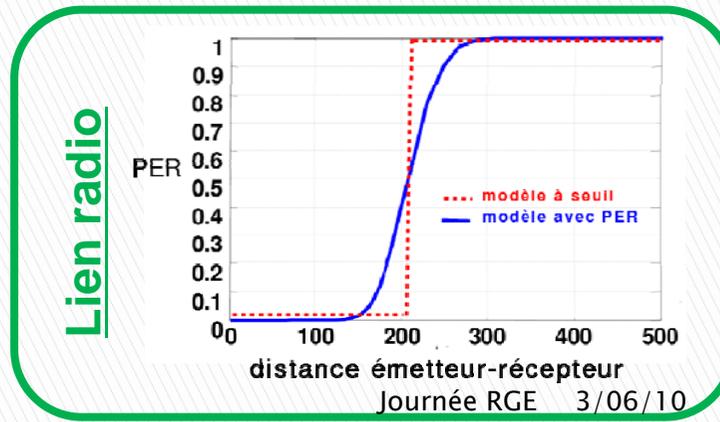
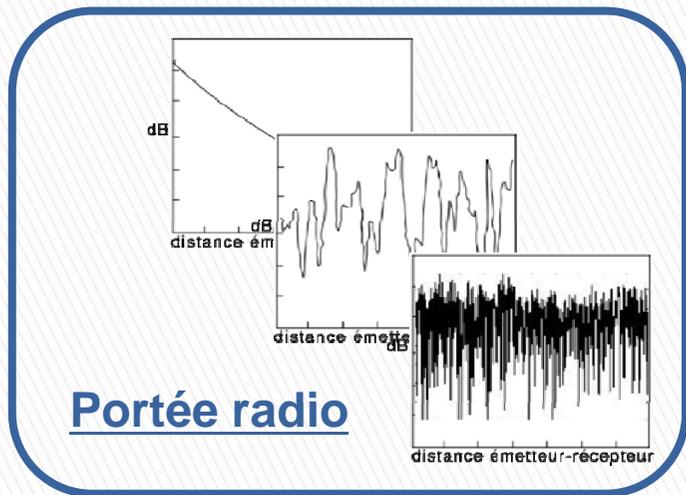
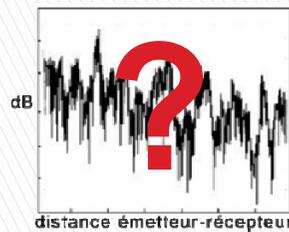
$$l_{ij} : \Omega^2 \mapsto B = \{0, 1\}$$

$$(x_i, x_j) \mapsto l(x_i, x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } \bar{\gamma}_{ij} \geq \bar{\gamma}_{lim} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

avec  $\bar{\gamma}_{ij} = h_{ij} \cdot \frac{P_i}{N_j}$

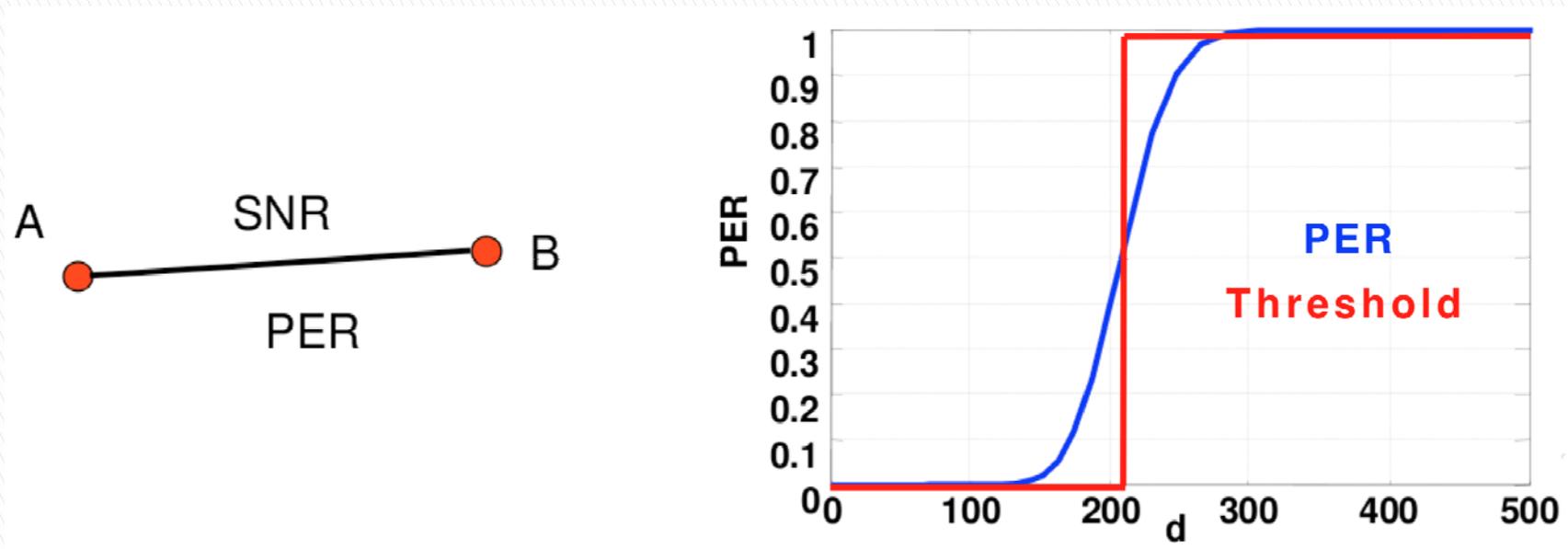
# Modélisation du canal radio

Lorsque j'é mets, est-ce que le Récepteur m'entend ?



# Modélisation du lien radio

On remplace le seuil de SNR par *un Bit Error Rate (BER)* et un *Packet Error Rate (PER)* fonction du SNR et de la modulation

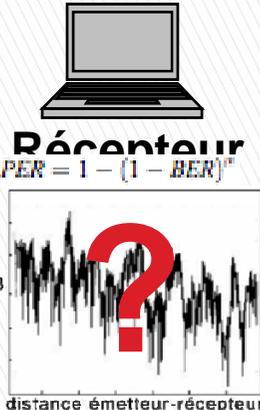
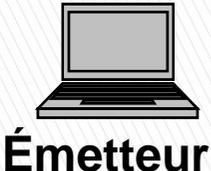


$$BER = f_{modulation}(SNR)$$

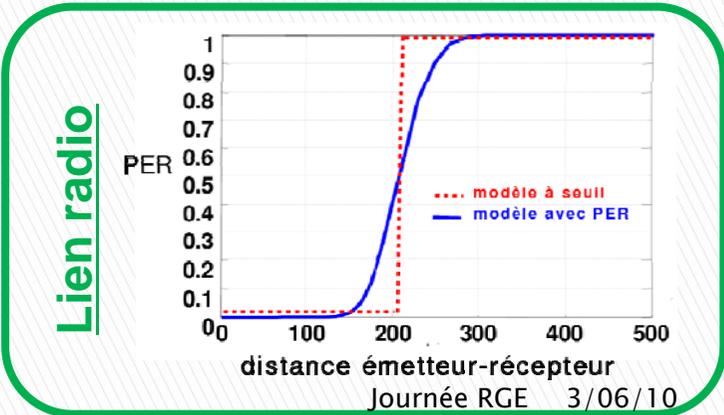
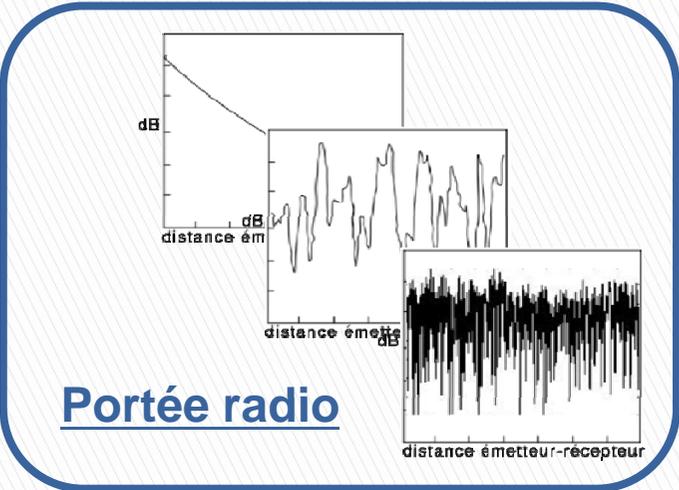
$$PER = 1 - (1 - BER)^N$$

# Modélisation du canal radio

Si tout va bien, est-ce que le récepteur prend et comprend toujours ?

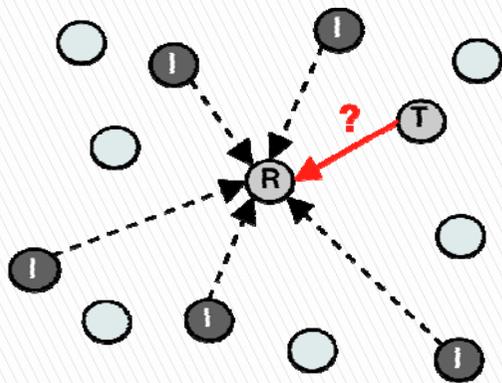


**Interférences**

$$SINR_{E,R} = \frac{SNR_{E,R}}{W_R + \sum_{i \in [1..n]} SNR_{i,R}}$$


# Modélisation des interférences

Les interférences sont un facteur fortement limitant du médium



Le SNR est remplacé par un *SINR* (*Signal to Interference and Noise ration*) défini dans le modèle *shotnoise* par :

$$\bar{\gamma}_{ij} = h_{ij} \cdot \frac{P_i}{N_j + \sum_{k \neq i,j} \alpha_{ik} \cdot h_{kj} \cdot P_k}$$

# Plan

- ▶ **Contexte général**
  - Les réseaux sans fil multi-sauts
  - Problématique de l'évaluation des protocoles
- ▶ **Le lien radio**
- ▶ **La simulation**
- ▶ **Cas d'étude et contributions**
  - Découverte de voisinage : impact de la couche PHY
  - Dissémination dans les réseaux de capteurs avec puits mobiles : impact des paramètres
- ▶ **Conclusions et perspectives**

# Simulation des réseaux sans fil

## Défis et contraintes des simulateurs :

- Architecture des nœuds (couches OSI)
- Architecture matérielle (batterie, etc.)
- Médium radio (propagation, interférences, etc.)
- Environnement physique
- Passage à l'échelle, précision des résultats, etc.

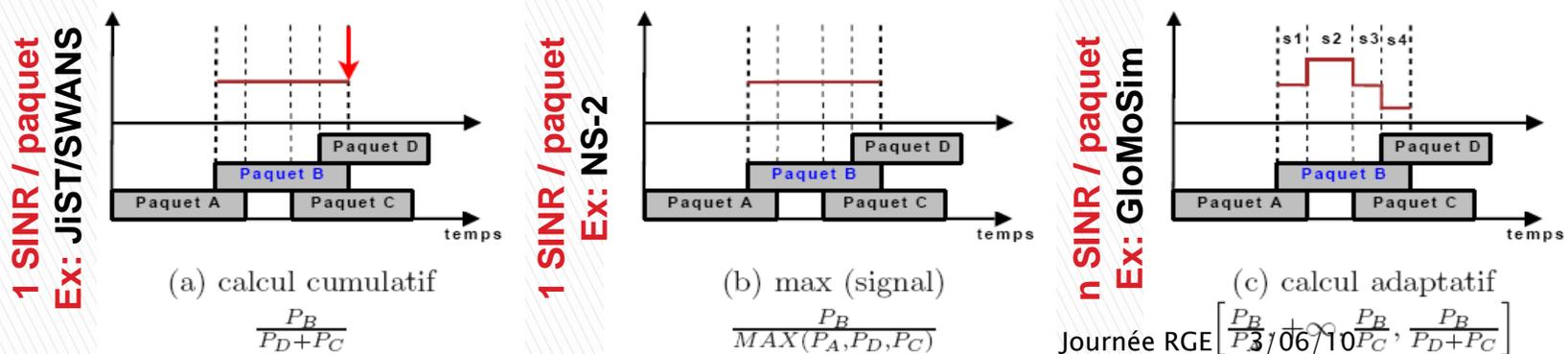
## État de l'art :

- **Simulateurs :**
  - NS-2, GloMoSim, JiST/SWANS, GTSNeTS, etc.
  - OMNet++, OPNET, etc.
- **Problématique :**
  - Passage à l'échelle au détriment du réalisme de la modélisation !
  - **Les résultats de simulation obtenus peuvent varier d'un simulateur à un autre...**

# Comparatif des simulateurs existants

Approches	JiST/SWANS	GTSNetS	GloMoSim	NS-2
Path-loss	Free-space, 2-ray	Free-space, 2-ray	Free-space, 2-ray	Free-space, 2-ray
Shadowing	-	-	Log-normal	Log-normal
Fading	Rician, rayleigh	-	Rician, rayleigh	Rician, rayleigh
Modèle lien	À seuil, PER	À seuil	À seuil, PER	À seuil
Modulation	BPSK	-	BPSK, QPSK	-
Modèle interférence	limité	limité	limité	limité
Calcul SINR	cumulatif	Max(signal)	adaptatif	Max(signal)

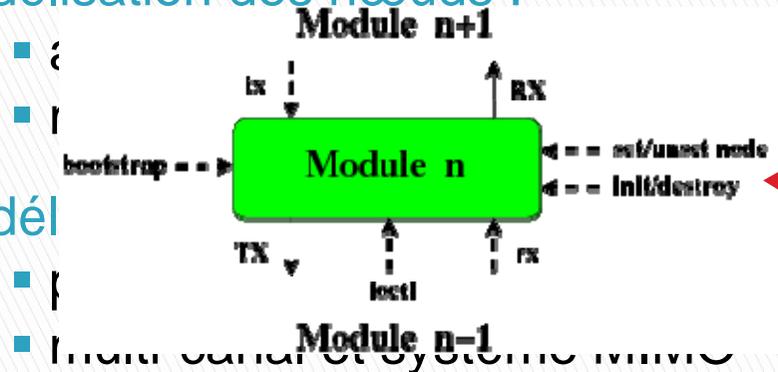
La méthode de calcul du SINR varie d'un simulateur à un autre :



# WSNet: présentation générale (1/2)

WSNet est environnement complet et modulaire pour la simulation des réseaux sans fil :

Modélisation des nœuds :



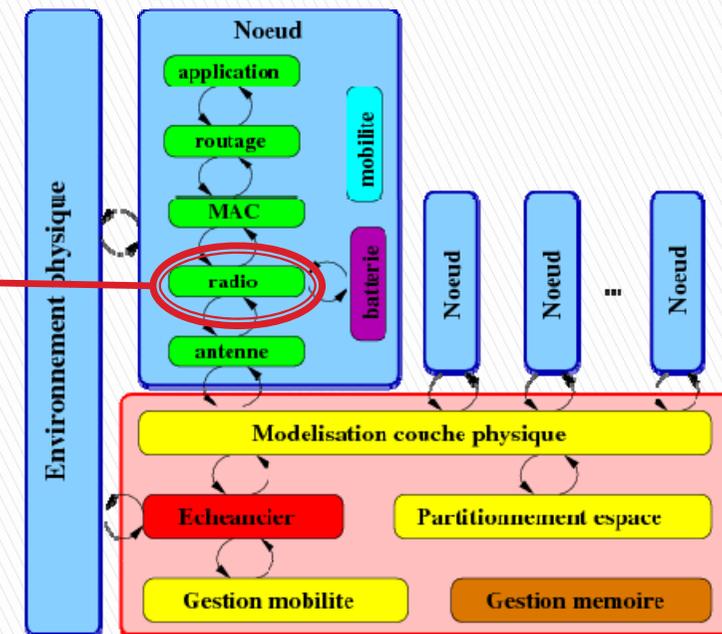
Modél

- 
- 
- 
- 

Modélisation de l'environnement :

Les modèles de simulation sont développés sous la forme de bibliothèques dynamiques et indépendantes.

- phénomènes physiques (feu, etc.)
- mesures physiques



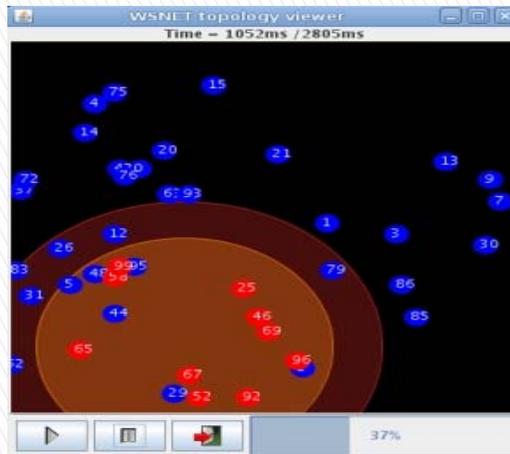
<http://wsnet.gforge.inria.fr>

# WSNet: présentation générale (2/2)

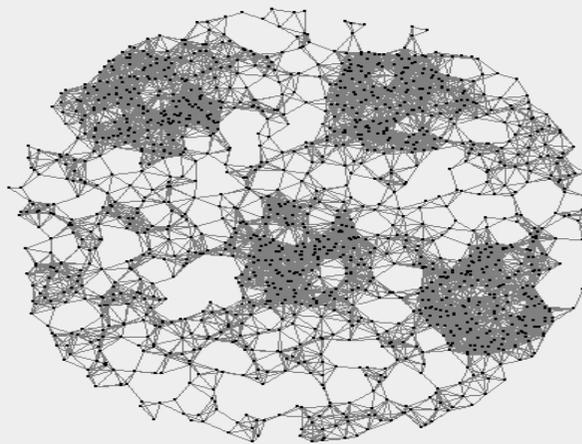
## Optimisation de WSNet :

- Débogage et profiling avancé (valgrind, kcache, gdb, etc.)
- Optimisation de la gestion de la mobilité, de la mémoire, des événements et de l'organisation spatiale des nœuds

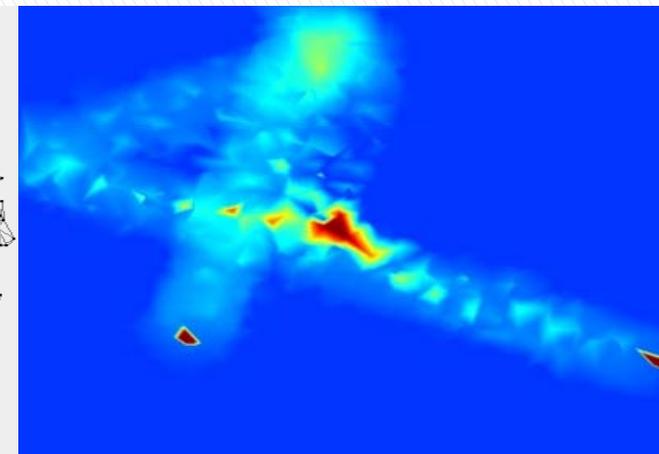
## Outils pour faciliter la simulation et l'étude des réseaux sans fil :



**WSNet-replay**



**WSNet-topogen**

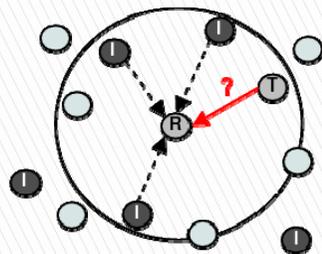


**Scripts WSNet**

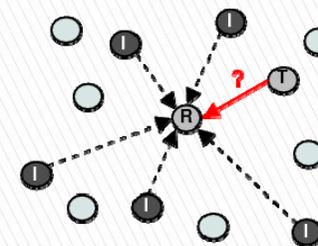
# WSNet vs Simulateurs de la littérature

Approches	JiST/SWANS	GloMoSim	NS-2	WSNet
Path-loss	Free-space, 2-ray	Free-space, 2-ray	Free-space, 2-ray	Disk model, Free-space, 2-ray, ITU indoor
Shadowing	-	Log-normal	Log-normal	Log-normal
Fading	Rician, rayleigh	Rician, rayleigh	Rician, rayleigh	Rayleigh, nakagami
Modèle lien	À seuil, PER	À seuil, PER	À seuil	À seuil, PER
Modulation	BPSK	BPSK, QPSK	-	BPSK, OQPSK, MQAM, STEP, none
Modèle interférence	limité	limité	limité	limité / complet
Calcul SINR	cumulatif	adaptatif	Max(signal)	adaptatif : [1...n] SINR / paquet

**Modèle d'interférence limité**



**Modèle d'interférence complet**



# Plan

- ▶ **Contexte général**
  - Les réseaux sans fil multi-sauts
  - Problématique de l'évaluation des protocoles
- ▶ **Le lien radio**
- ▶ **La simulation**
- ▶ **Cas d'étude et contributions**
  - Découverte de voisinage : impact de la couche PHY
  - Dissémination dans les réseaux de capteurs avec puits mobiles : impact des paramètres
- ▶ **Conclusions et perspectives**

# Découverte de voisinage

## Découverte de voisinage :

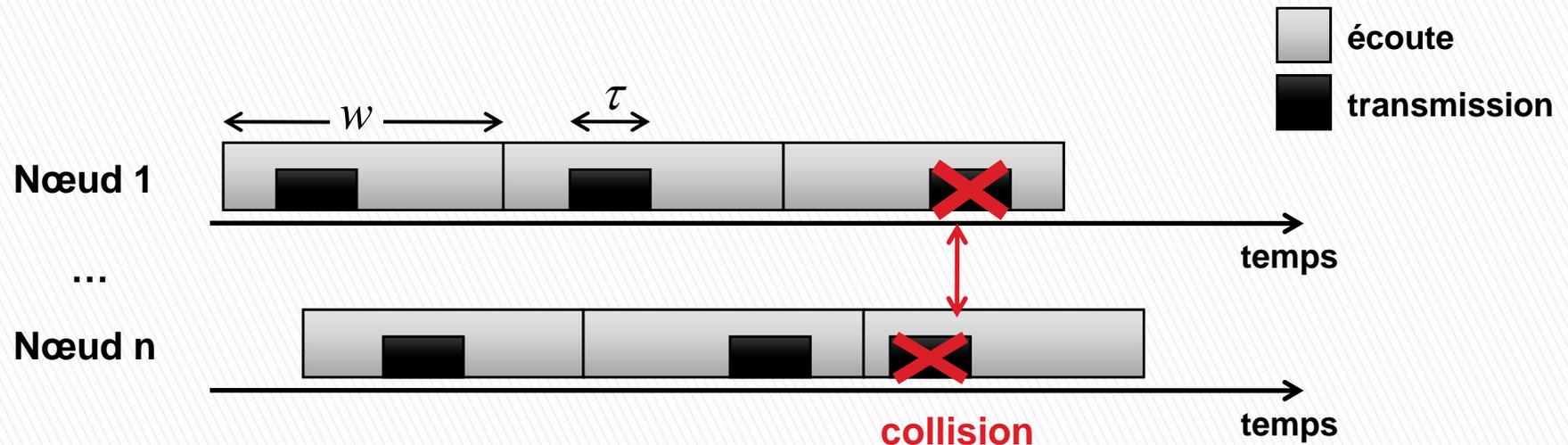
- Service fondamental pour les communications multi-sauts
- Echange périodique de messages hello
- Construction et maintien de tables de voisinage

## État de l'art :

- Applications :
  - Routage, contrôle de topologie
  - Réseaux DTN, réseaux de contact
- Conception des protocoles hello :
  - Optimisation des paramètres du protocole
  - **MAIS** couche PHY idéale !

# Protocole hello aléatoire

## Principe du protocole hello :



- Variante du protocole MAC *Aloha* :
  - fenêtre temporelle de taille  $w$
  - pas de *carrier sensing*
- 2 états : écoute du canal ( $w - \tau$ ) et transmission ( $\tau$ )
- Le paramètre  $w$  impacte la probabilité de découverte d'un nœud

# Simulation : paramètres

## Paramètres de simulation :

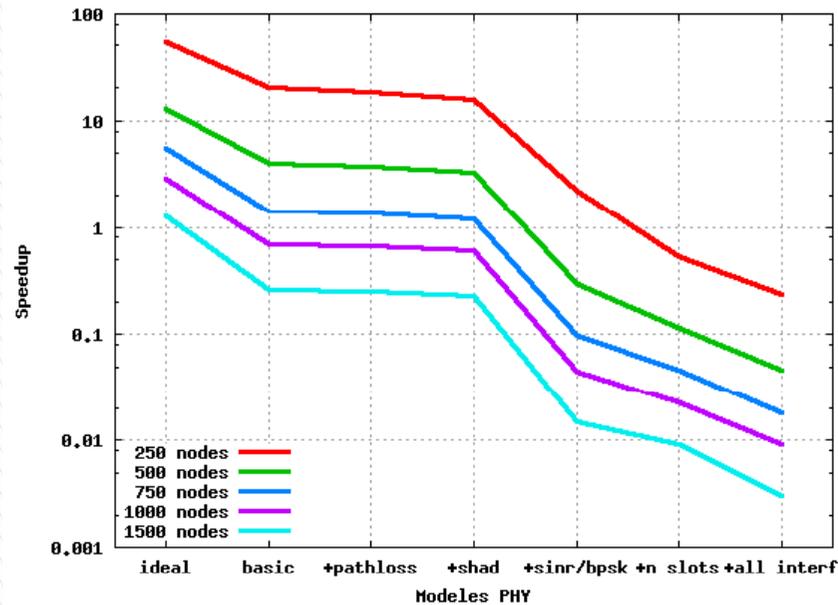
- WSNet wireless network simulator (<http://wsnet.gforge.inria.fr>)
- Protocole *HELLO* simple sans *carrier sense* (CS) ni *clear channel assesment* (CCA)
- Fenêtre d'activité  $w = 500ms$ , taille de paquet *HELLO* = 50B
- Radio compatible IEEE 802.15.4 868MHz sans couche MAC
- Puissance de transmission 0dBm, sensibilité radio -92dBm
- 30 répétitions

## Métriques :

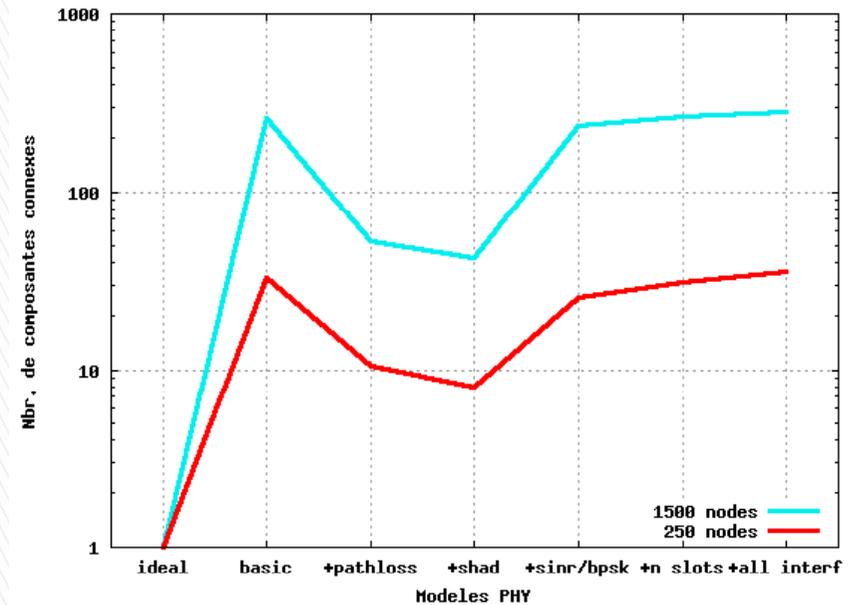
- Nombre de voisins découverts
- Distance au voisin le plus éloigné
- Nombre de composantes connexes
- Probabilité de succès de lien
- Scalabilité

# Simulation : impact de la couche PHY

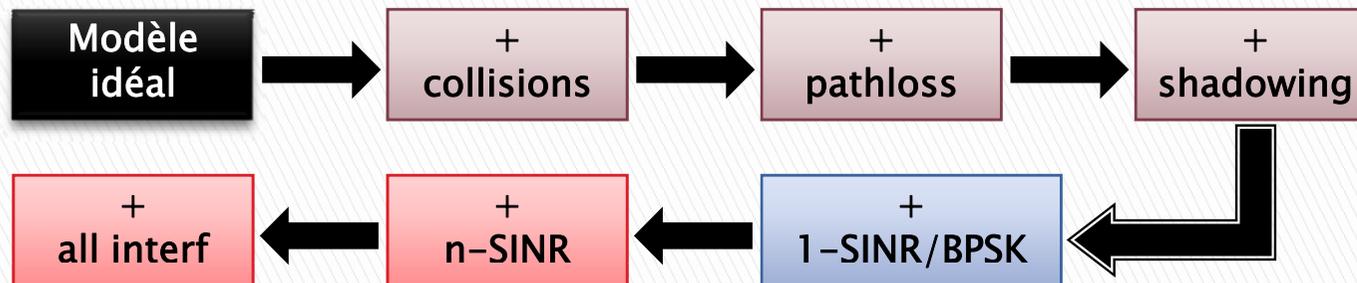
## Speedup



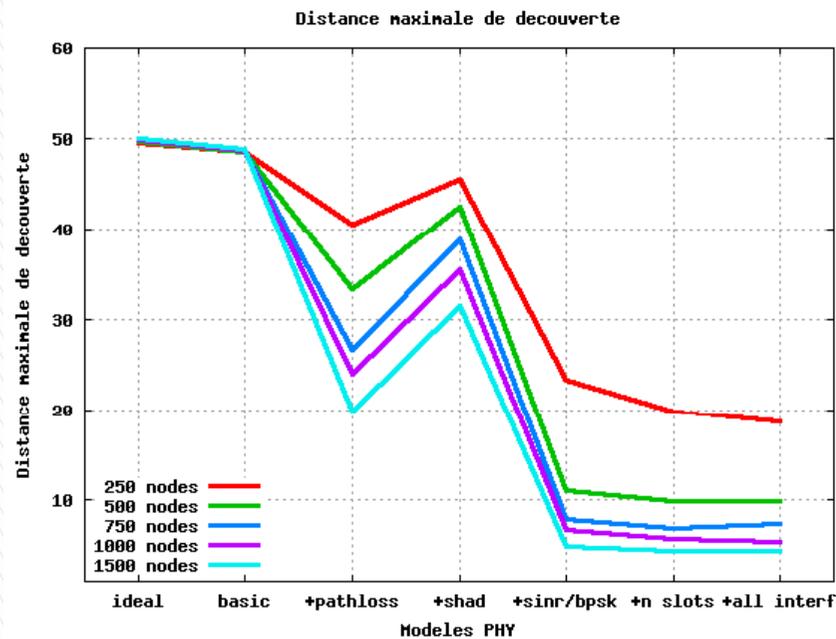
## Nbr. de composantes connexes



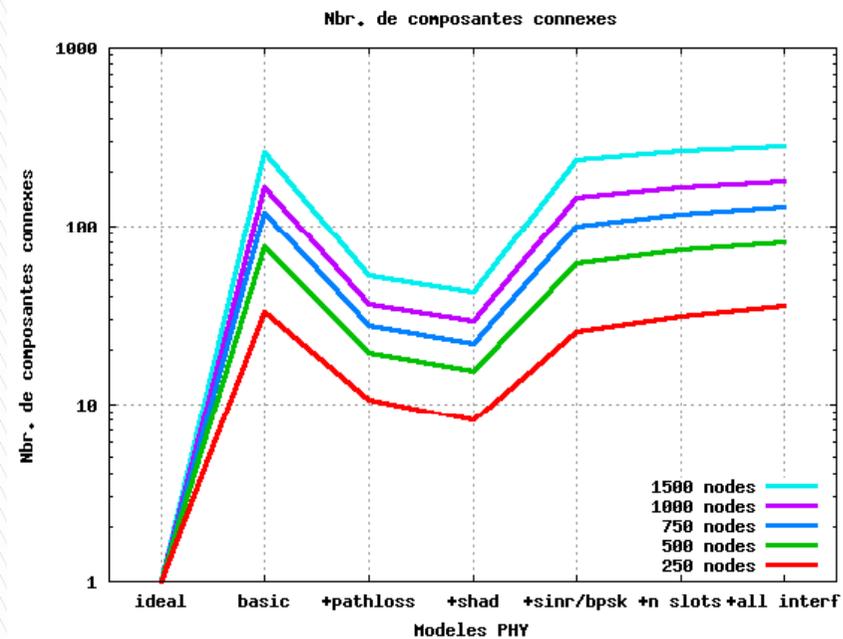
**Modélisation  
couche PHY**



# Simulation : distance max / connexité



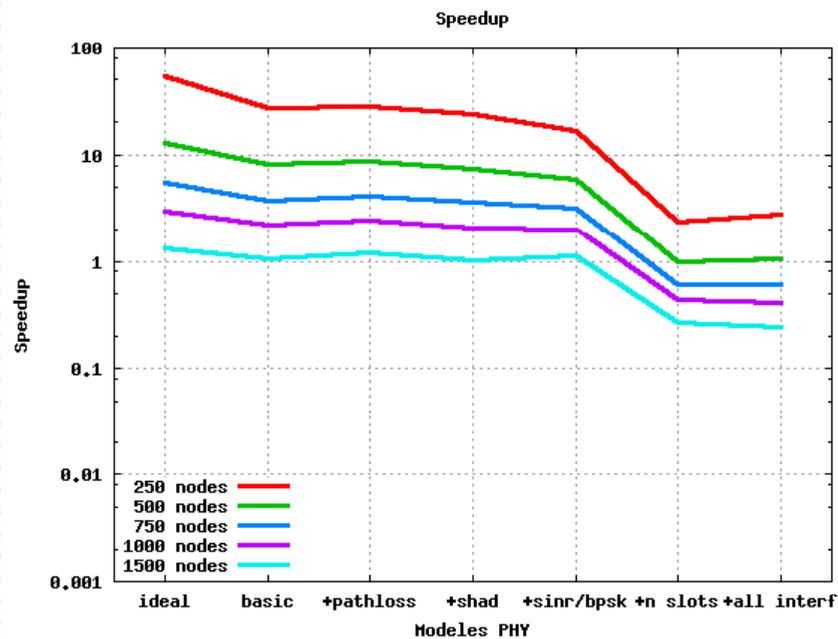
Distance maximale de découverte



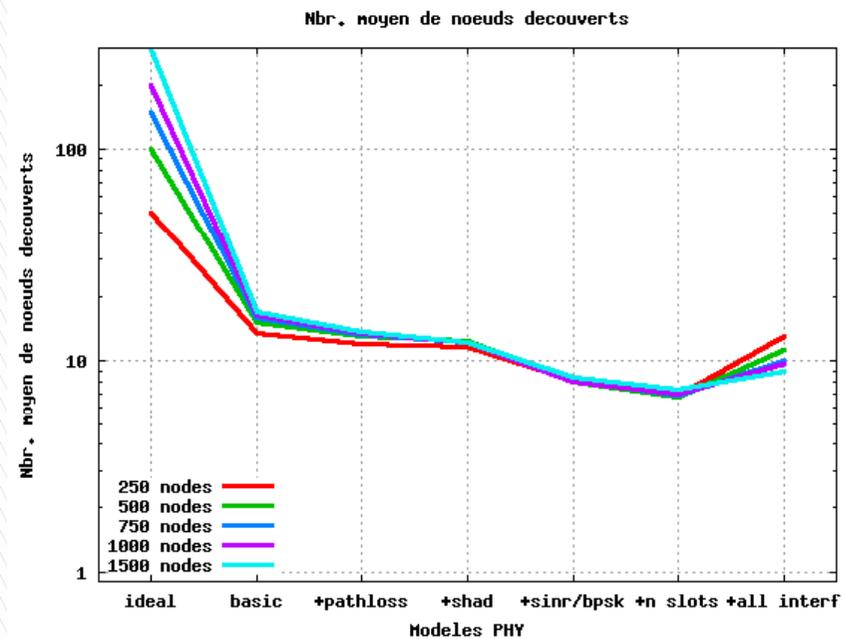
Nbr. de composantes connexes

✓ La couche PHY **impacte significativement** la distance maximale de découverte ainsi que la connexité de la topologie.

# Simulation : avec couche MAC



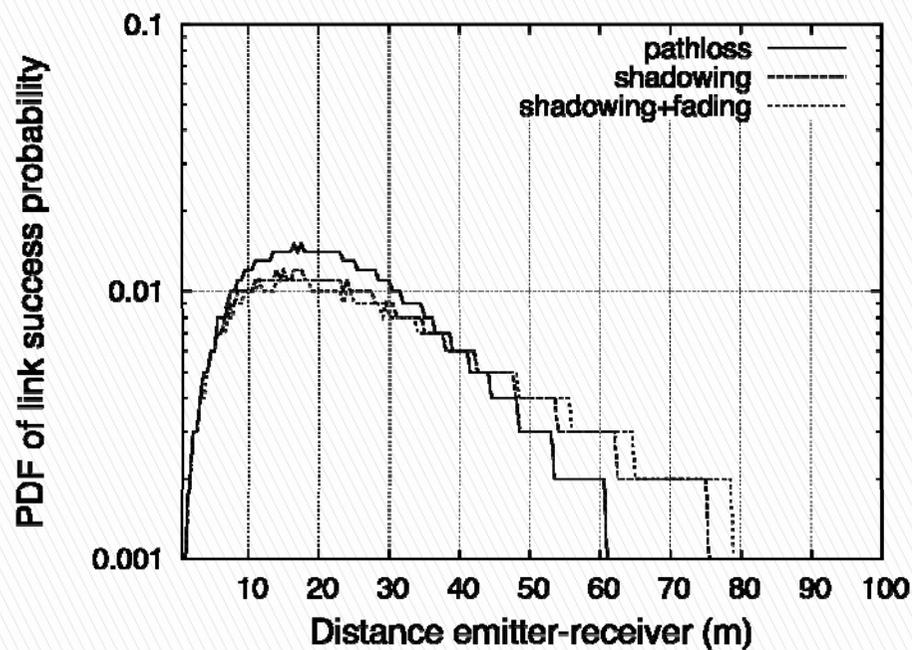
Speedup



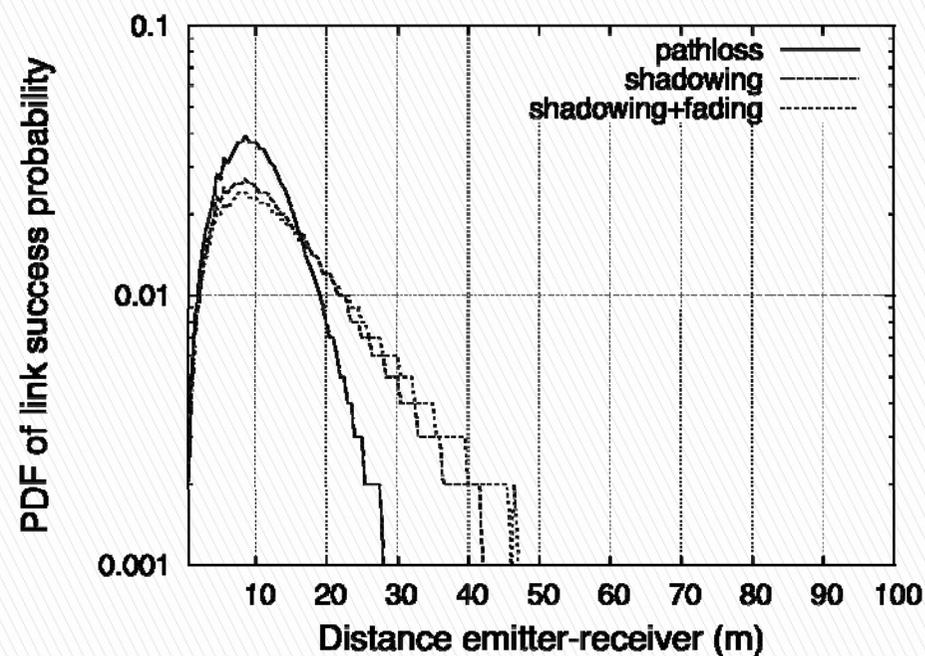
Nbr. de composantes connexes

- ✓ L'ajout d'une couche MAC complexifie la simulation (nbr. d'événements)
- ✓ Mais les performances obtenus sont améliorées car réduction du nombre d'interférants...

# Simulation : succès de lien

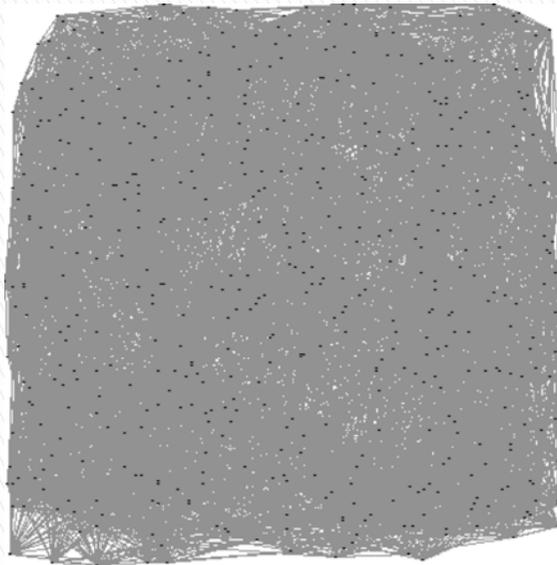


sans interférence

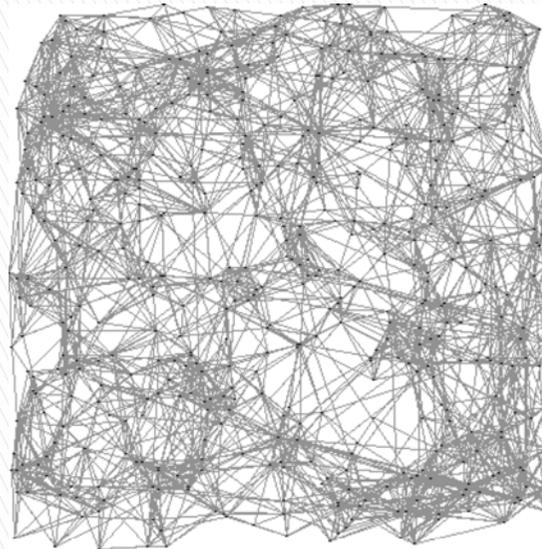


avec interférence

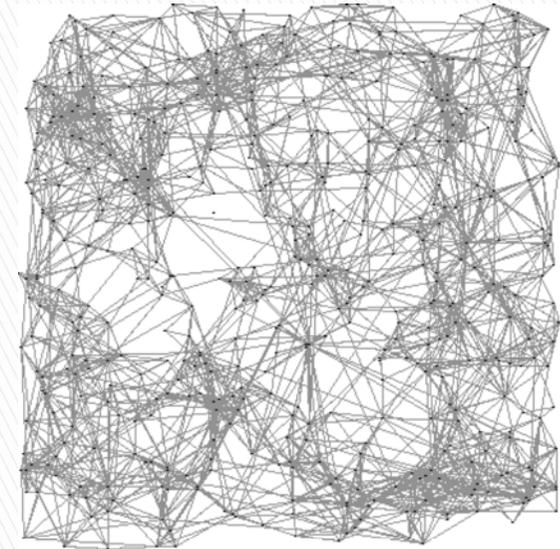
# Simulation : en résumé



Degré moyen = 24



Degré moyen = 7



Degré moyen = 6

- a) Sans interférence
- b) Interférence complète, BPSK, 1-SINR
- c) Interférence complète, BPSK,  $n$ -SINR

# Plan

- ▶ **Contexte général**
  - Les réseaux sans fil multi-sauts
  - Problématique de l'évaluation des protocoles
- ▶ **Le lien radio**
- ▶ **La simulation**
- ▶ **Cas d'étude et contributions**
  - Découverte de voisinage : impact de la couche PHY
  - Dissémination dans les réseaux de capteurs avec puits mobiles : impact des paramètres
- ▶ **Conclusions et perspectives**

# Puits mobile : pourquoi ?

## Dissémination et collecte des données

- Acquisition d'informations par les capteurs
- Dissémination vers la station de base (ou puits)
- Dissémination : périodique, orientée événements et requêtes

## Puits mobile

- Augmenter la durée de vie du réseau
- Améliorer la connectivité
- Contraintes applicatives

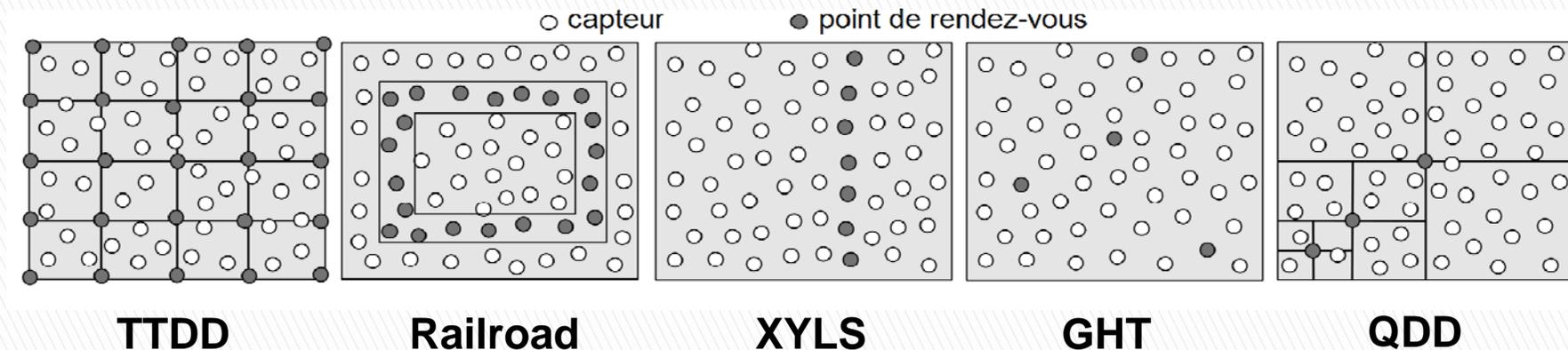
## Contraintes et défis

- Gestion de la mobilité du puits
- Localisation du puits et dissémination

# Puits mobile : état de l'art

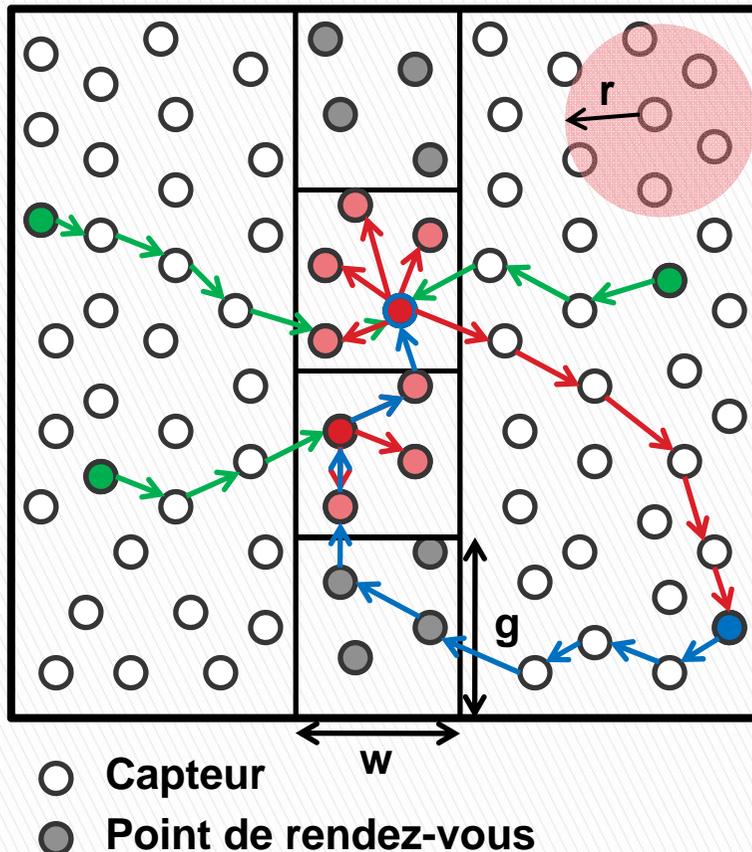
## Approches :

- Modèle de communication **point à point** (*datamules*, etc.)
- Modèle de communication **multi-sauts** :
  - Superposition d'une structure logique
  - Zone de rendez-vous pour les données et requêtes



**Motivation** : **évaluer** l'impact de ces structures géométriques sur les **coûts de communication** et la **durée de vie du réseau**.

# LBDD



## Hypothèses :

- Connaissance bordure réseau
- Connaissance position géographique
- Bande centrale de largeur  $w$  et divisée en groupes de taille  $g$

## Dissémination :

- Des sources vers le chef de groupe
- Données répliquées sur le groupe

## Collecte :

- Du puits vers zone de rendez-vous
- Données renvoyées au puits

# Analyse des performances

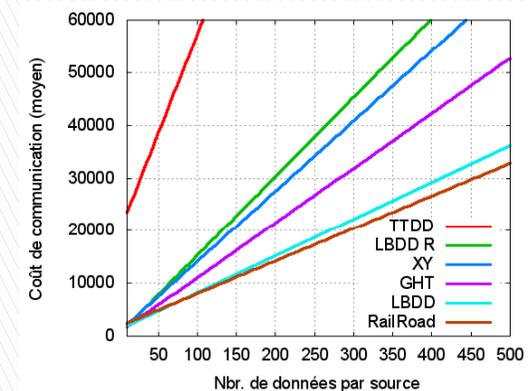
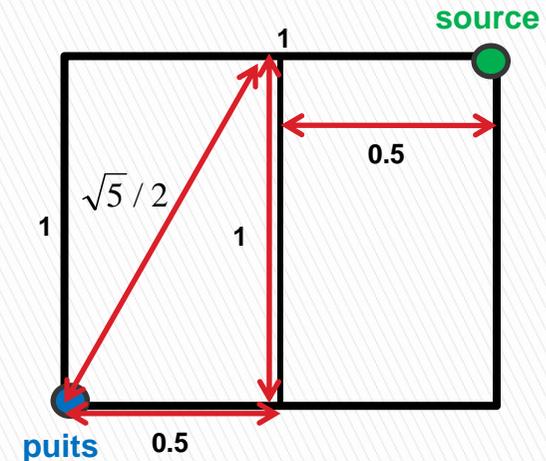
## Evaluation analytique :

- Calcul des distances entre les entités
- Calcul du coût de communication
- Calcul du facteur d'élongation

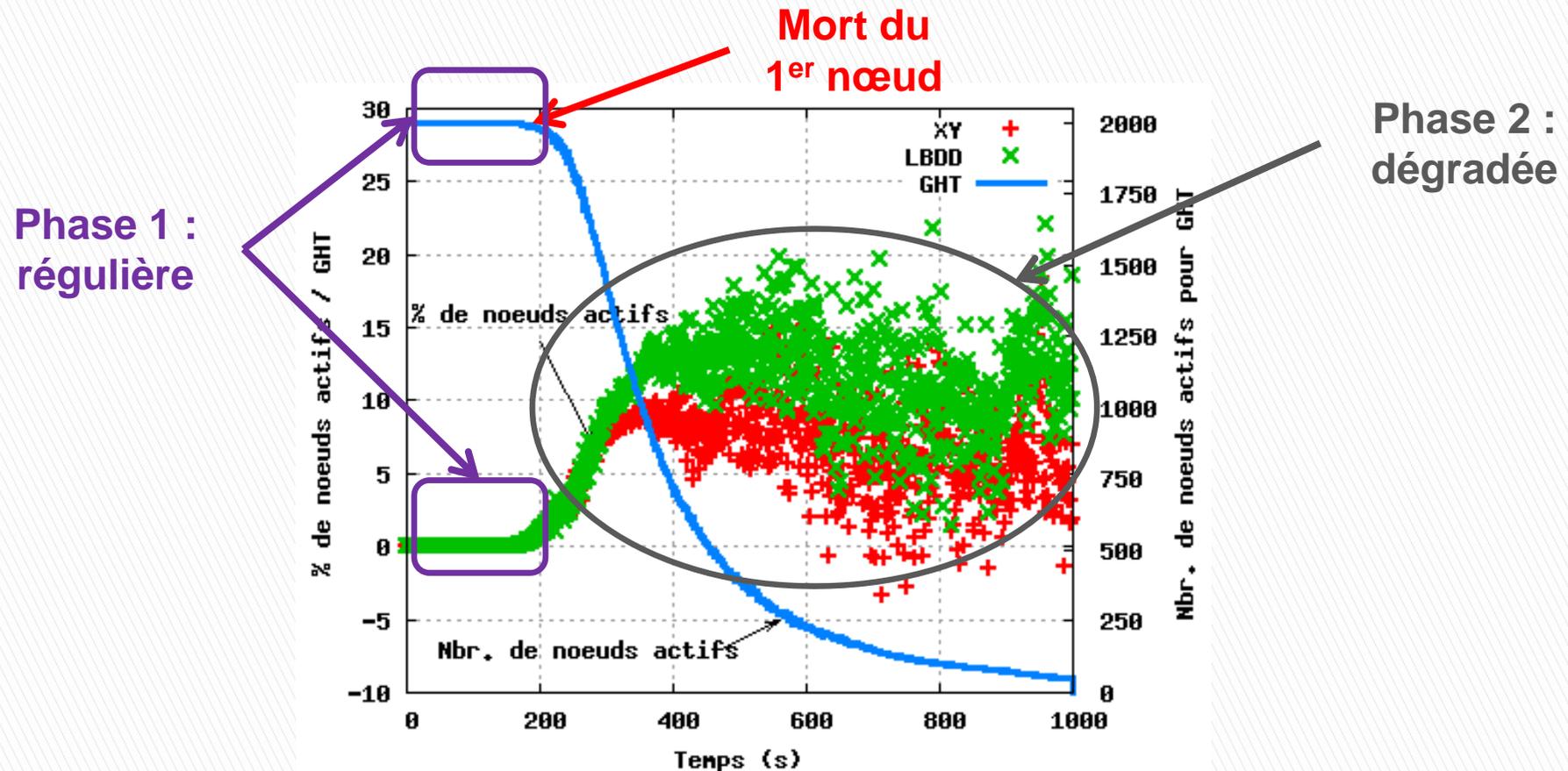
## Limites de l'analyse théorique :

- Couche physique idéale
- Dépendance entre MAC et routage
- Métriques de performance limités

**Intérêt de la simulation...**



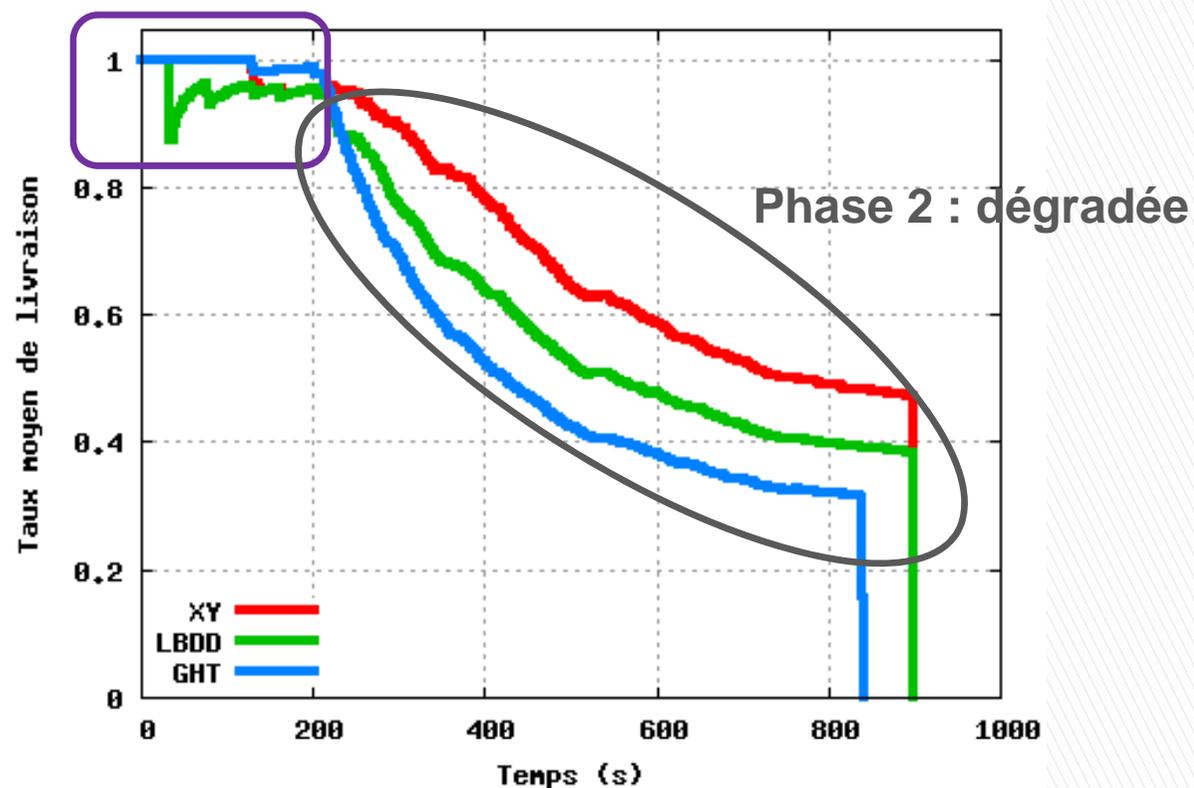
# Simulation : durée de vie des noeuds



- ✓ Présence de deux phases : régulière et dégradée
- ✓ LBDD et XY présentent une meilleure durée de vie par rapport à GHT

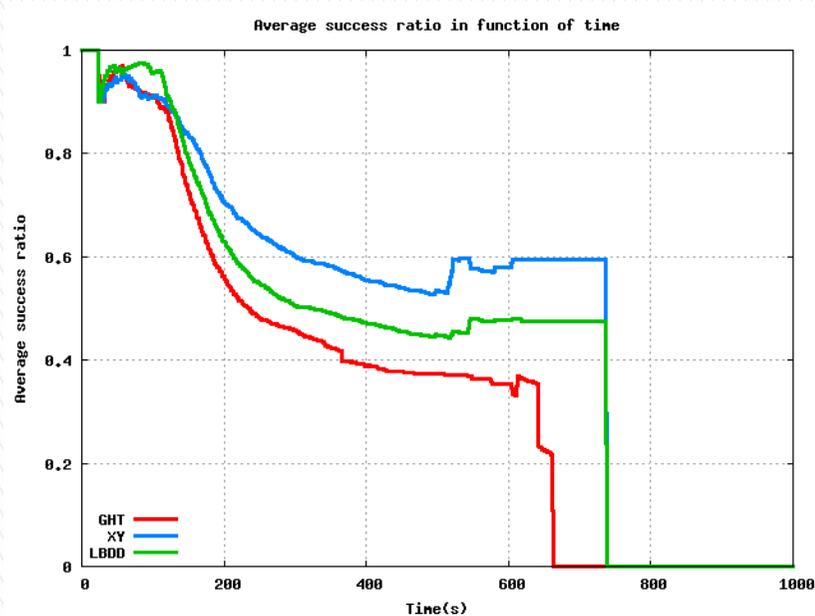
# Simulation : durée de vie du réseau

## Phase 1 : régulière

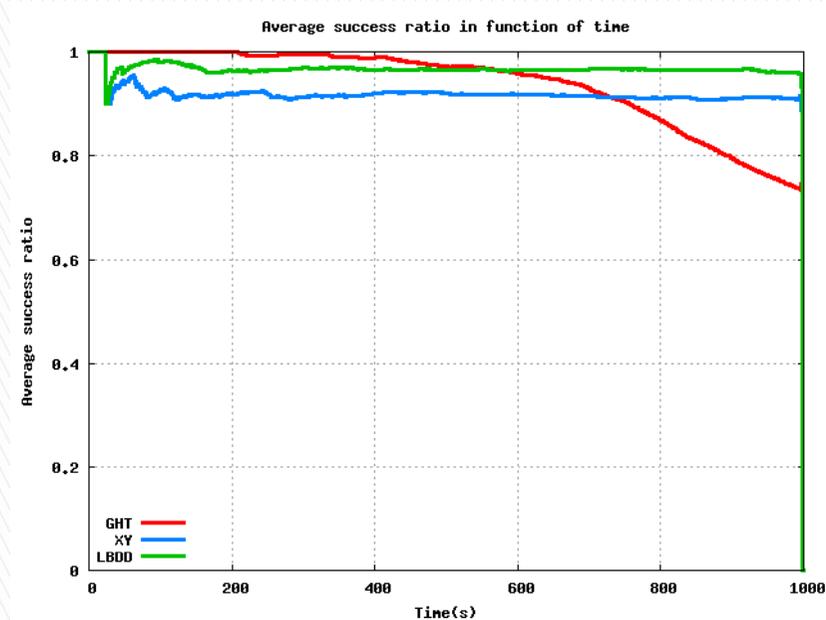


- ✓ Présence également des deux phases : régulière et dégradée
- ✓ LBDD et XY présentent un meilleur taux de livraison par rapport à GHT

# Simulation : impact des paramètres



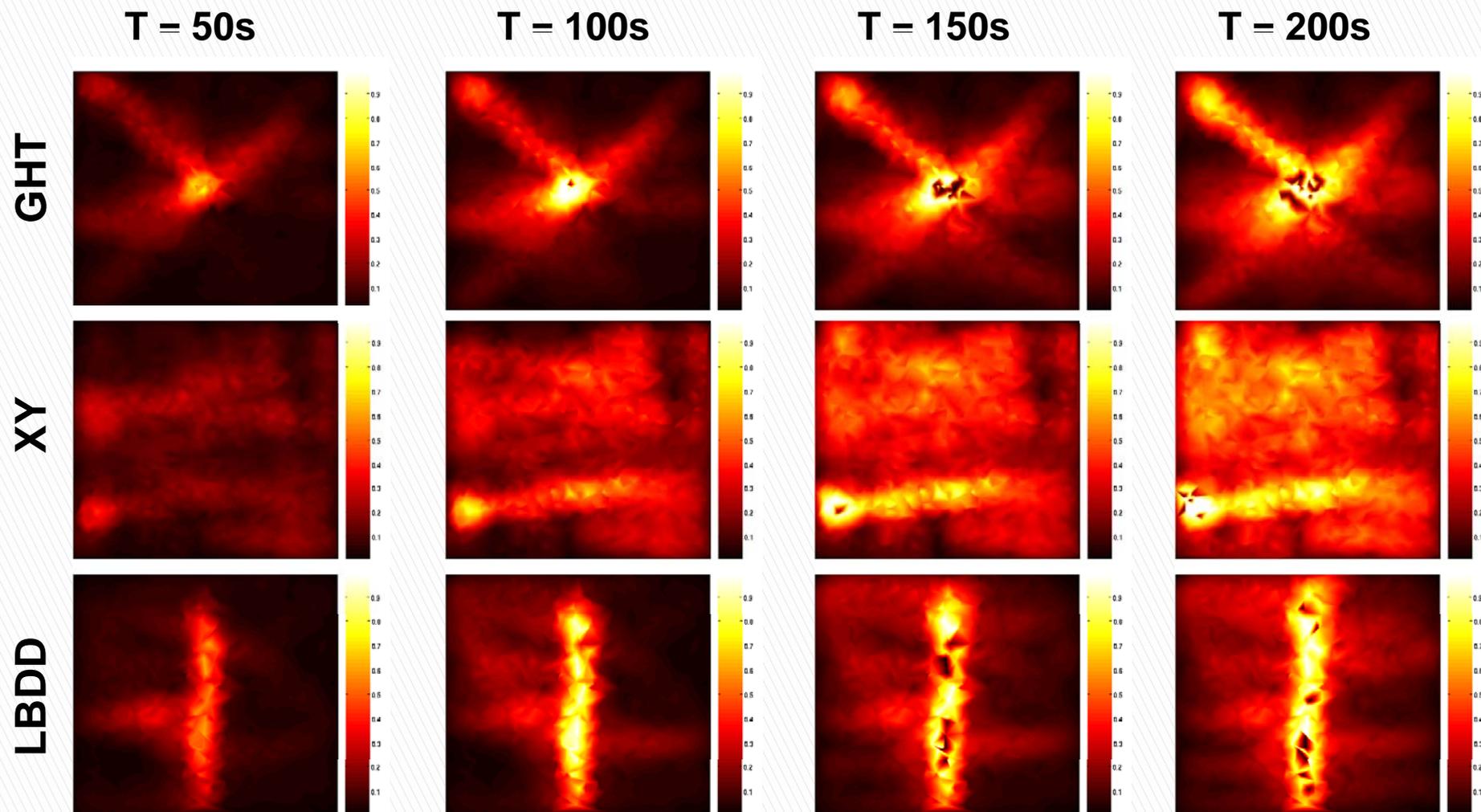
Activity period  $w = 1s$



Activity period  $w = 10s$

- ✓ Impact de la fenêtre d'activité du protocole *HELLO*
- ✓ « L'ordre » des protocoles n'est pas forcément le même

# Simulation : distribution énergie



# Plan

- ▶ **Contexte général**
  - Les réseaux sans fil multi-sauts
  - Problématique de l'évaluation des protocoles
- ▶ **Le lien radio**
- ▶ **La simulation**
- ▶ **Cas d'étude et contributions**
  - Découverte de voisinage : impact de la couche PHY
  - Dissémination dans les réseaux de capteurs avec puits mobiles : impact des paramètres
- ▶ **Conclusions et perspectives**

# Conclusions (1/2)

## Vers une « bonne » simulation des réseaux sans fil :

- Implémenter / utiliser des **modèles PHY réalistes** ;
- Jusqu'à quelle complexité...
  - ... ex: corrélations temporelle et spatiale pour la modélisation du *fading* et du *shadowing*

## Vers une « bonne » évaluation des protocoles :

- Quelles valeurs de paramètres utiliser ?
- Choix judicieux des métriques :
  - durée de vie du réseau
- Phase régulière / phase dégradée...

# Conclusions (2/2)

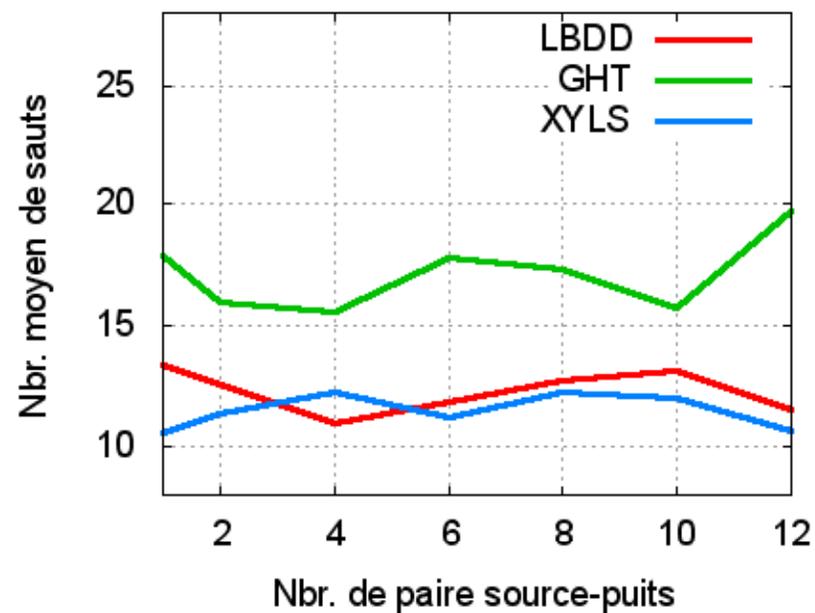
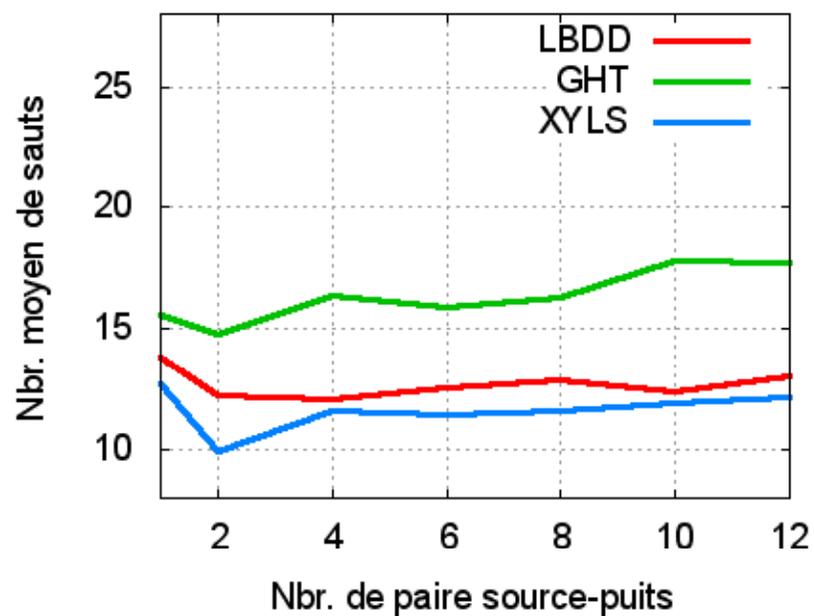
## Vers une bonne méthodologie de simulation :

- Reproductibilité des simulations
- Répétition des simulations
  - intervalles de confiance
- Recherche d'états stationnaires

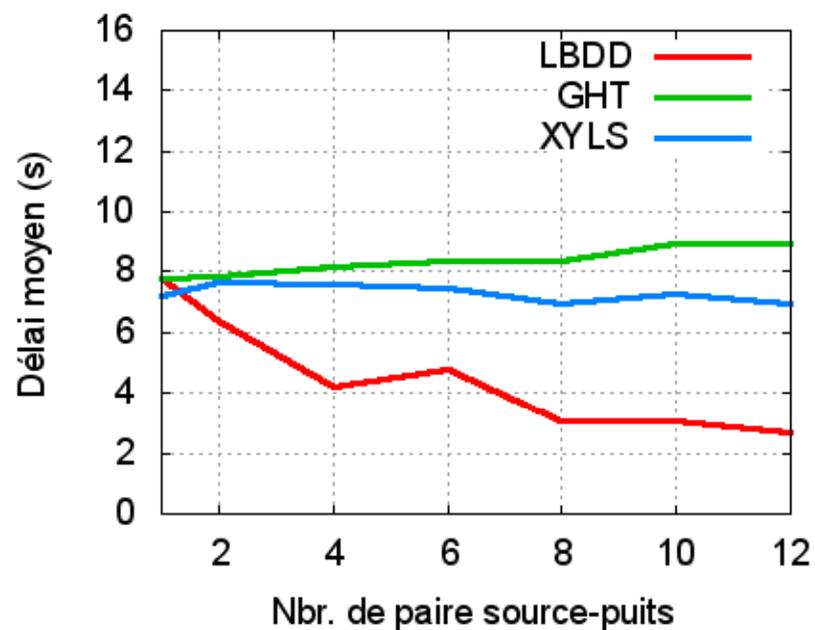
## Quelques conseils :

- Fonctionner de manière incrémentale vis-à-vis de :
  - la taille du réseau
  - la complexité de ce qui est simulé
- Choix de métriques qui « parlent »
- Chercher à comprendre le « pourquoi » des résultats
  - même si on est très souvent dépassé par la complexité...

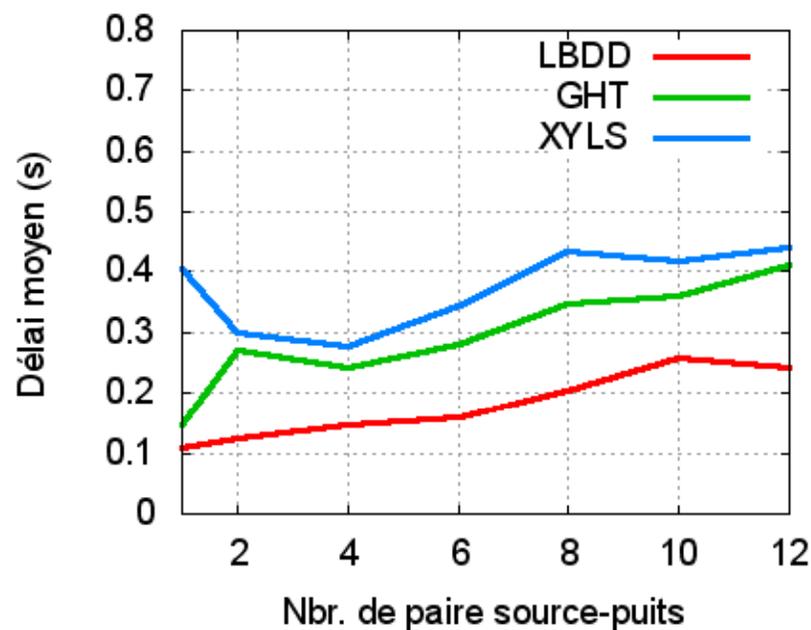
# Simulation : nombre de sauts



# Simulation : délai de livraison



**Scénario 1**  
(1req/1s + 1data/0.5s)



**Scénario 2**  
(1req/0.5s + 1data/1s)

✓ LBDD présente un délai de livraison minimal