

Reproduction des Résultats de Paul Baran

ARE 2024-2025

Arian DERVISHAJ

7 mars 2025

1 Objectif

L'objectif principal de ce laboratoire est de reproduire les résultats de simulation présentés dans l'article de Paul Baran pour démontrer la robustesse des réseaux de communication distribués.

1.1 Définitions

Importance d'un noeud Une mesure combinant la centralité en degré et la centralité d'intermédiairité, indiquant l'impact potentiel de la suppression d'un noeud sur la connectivité du réseau.

Centralité en degré Le nombre de liens connectés à un noeud donné.

Centralité d'intermédiairité (betweenness) Une mesure de l'importance d'un noeud basée sur le nombre de plus courts chemins qui passent par lui.

2 Résultats et Conclusions

2.1 Topologies et importances des noeuds

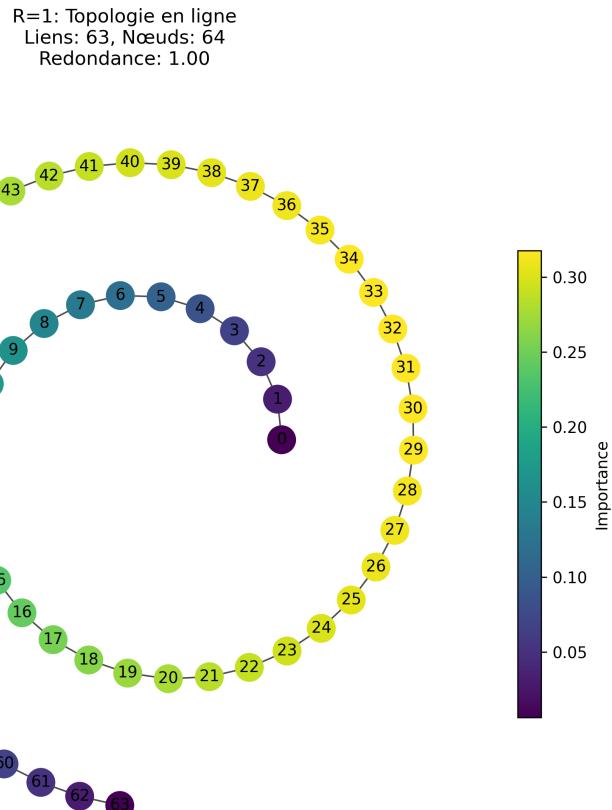


Figure 1: Topologie en ligne

La topologie en ligne possède une redondance de 1.00, ce qui indique qu'il n'existe pas de chemins alternatifs entre les noeuds.

Dans cette topologie, les noeuds centraux (région 27-37) sont les plus critiques (couleur jaune-vert) car leur panne diviserait le réseau en deux parties de taille comparable, maximisant la perte de connectivité. Les noeuds aux extrémités (bleu foncé/violet) sont moins critiques.

Avec 63 liens pour 64 noeuds, cette topologie utilise le nombre minimal de connexions pour maintenir un réseau connecté. Son coût d'infrastructure est donc minimal, ce qui la rend économiquement avantageuse pour des réseaux à faible budget ou des applications où la fiabilité n'est pas essentielle.

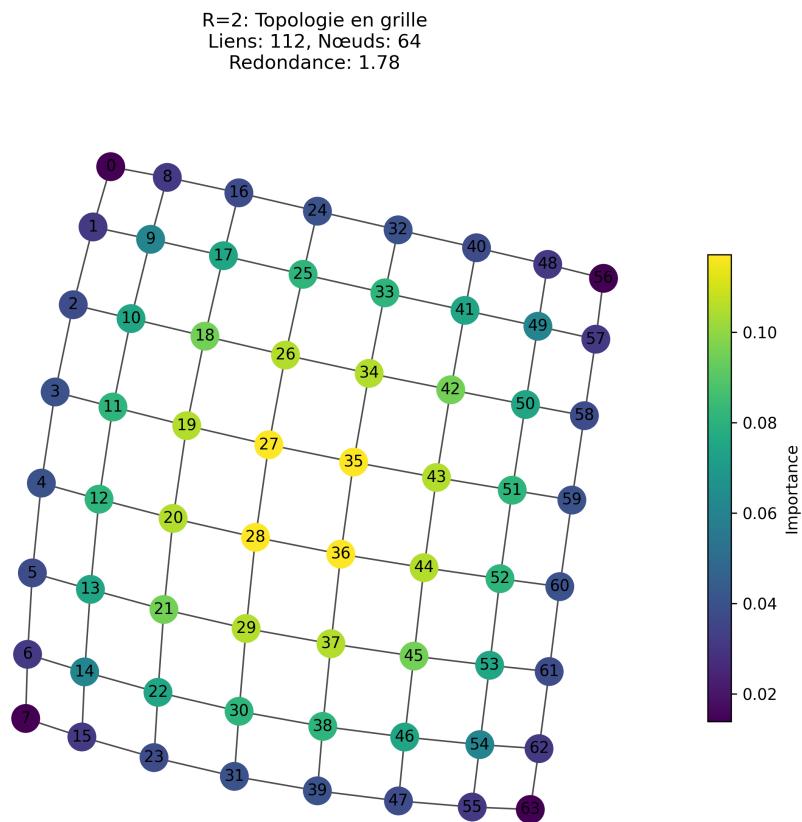


Figure 2: Topologie en grille

La topologie en grille offre une redondance de 1.78, presque deux fois supérieure à celle de la ligne. Cette structure crée des chemins alternatifs qui améliorent la résilience globale. Les noeuds centraux (en jaune) sont les plus critiques car ils font partie de nombreux plus courts chemins du réseau.

Avec 112 liens, cette topologie nécessite 1.78 fois le nombre minimal de liens. Cette augmentation du coût apporte un bénéfice significatif en termes de résilience. Le rapport coût-résilience est relativement bon, car chaque lien supplémentaire contribue à créer des chemins alternatifs importants.

R=3: Topologie en grille+
 Liens: 161, Nœuds: 64
 Redondance: 2.56

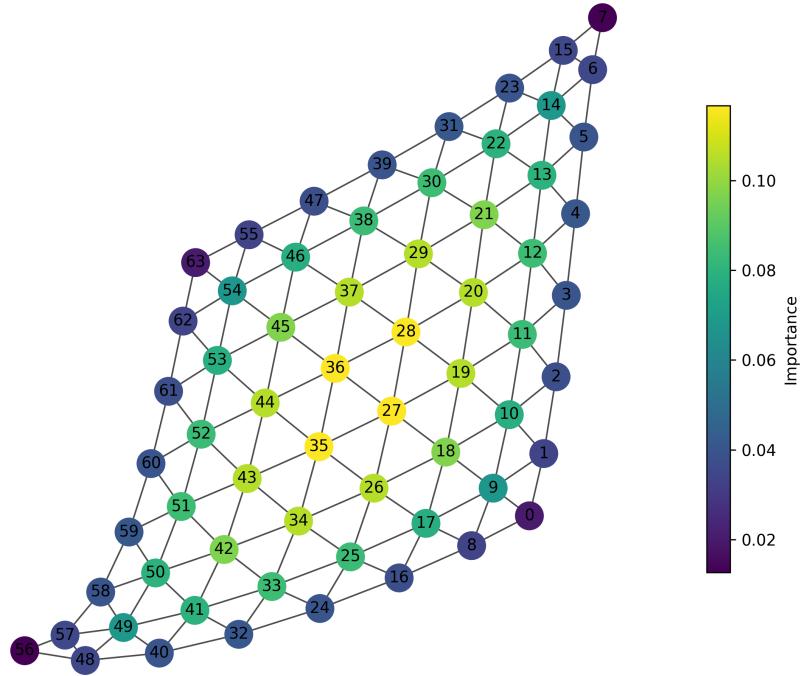


Figure 3: Topologie en grille avec diagonale unique

La topologie en grille+ atteint une redondance de 2.56. Cette augmentation des liens (161 contre 112 dans la grille simple) crée davantage de chemins alternatifs. La distribution de l'importance reste similaire à celle de la grille.

Avec 161 liens (2.56 fois le minimum), le coût d'infrastructure est nettement plus élevé. L'investissement de 49 liens supplémentaires par rapport à la grille simple apporte un gain de redondance de 0.78.

R=4: Topologie en grille++
 Liens: 210, Nœuds: 64
 Redondance: 3.33

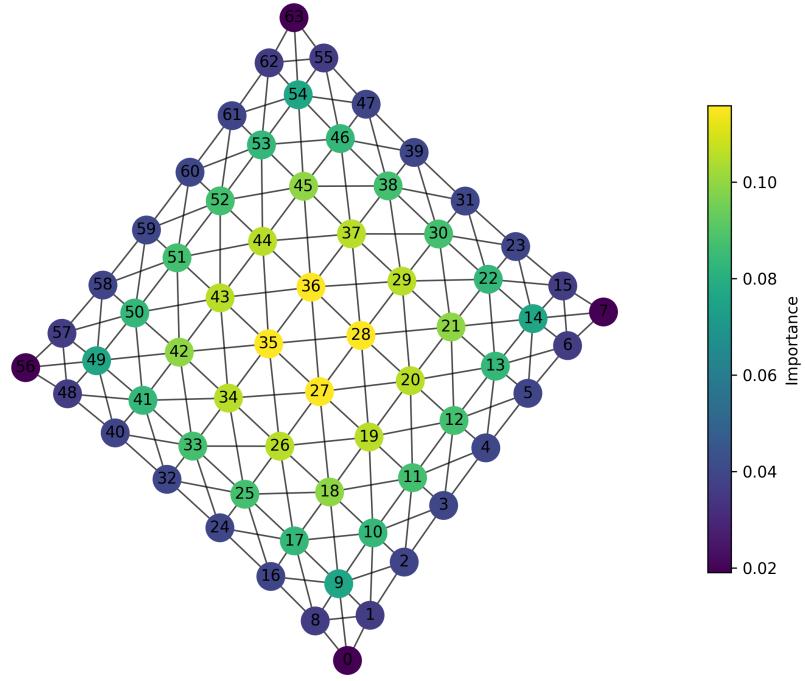


Figure 4: Topologie en grille avec diagonale double

En ajoutant des connexions diagonales dans les deux directions, la topologie grille++ atteint une redondance de 3.33, avec 210 liens pour 64 noeuds. La distribution d'importance des noeuds reste similaire aux autres grilles.

Cette topologie est la plus coûteuse, nécessitant 210 liens (3.33 fois le minimum). L'ajout de 49 liens supplémentaires par rapport à la grille+ pour un gain de redondance de 0.77 que l'ajout du même nombre de liens n'augmente pas la résilience de la topologie du même facteur.

Topologie en Anneau
Liens: 64, Nœuds: 64
Redondance: 1.02

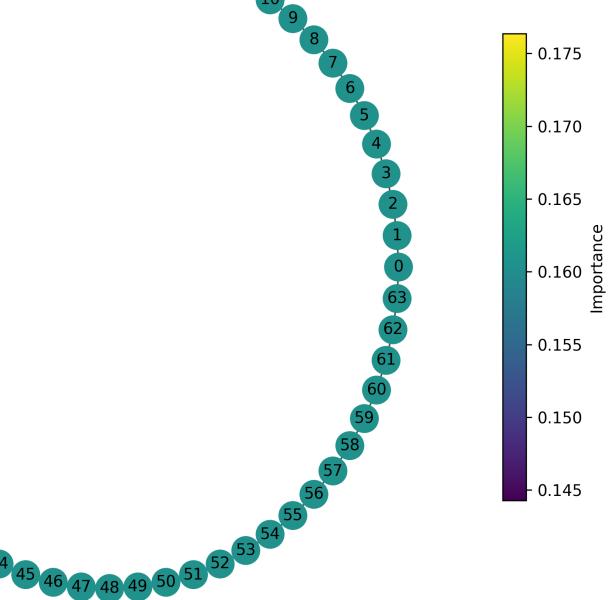


Figure 5: Topologie en anneau

L'anneau présente une redondance légèrement supérieure à 1 (1.02) avec un seul lien de plus que le minimum nécessaire pour 64 noeuds. Sa structure symétrique se traduit par une distribution d'importance uniforme des noeuds (tous en vert-bleu).

Avec seulement 64 liens, cette topologie offre un bon rapport coût-redondance pour les environnements nécessitant une égalité d'importance entre les noeuds.

Topologie en étoile
Liens: 63, Nœuds: 64
Redondance: 1.00

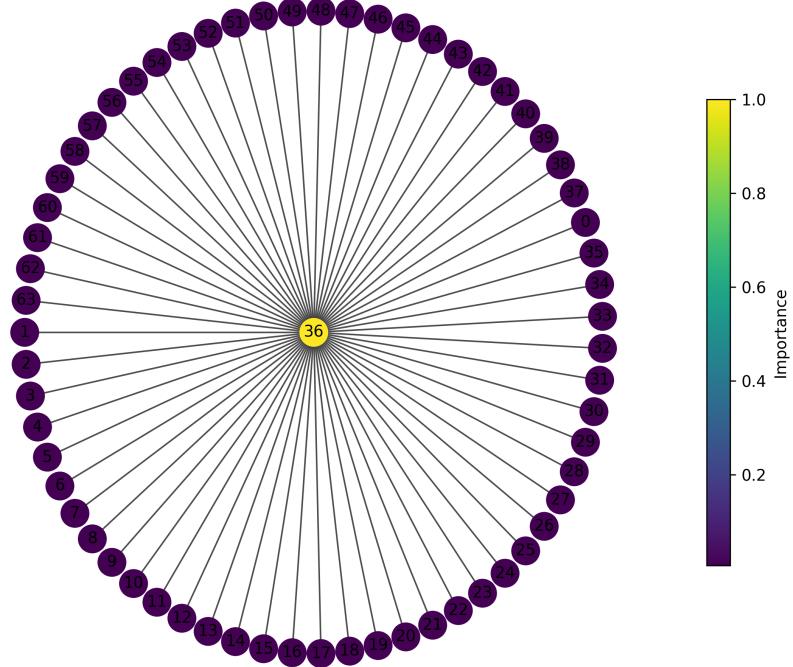


Figure 6: Topologie en étoile

La topologie en étoile présente la distribution d'importance la plus contrastée : le noeud central (36) affiche une importance de 1.0 (jaune vif) tandis que tous les autres noeuds périphériques ont une importance minimale (violet foncé). Cette configuration crée un point unique de défaillance.

Utilisant le nombre minimal de liens (63), cette topologie offre un diamètre de réseau minimal (2 sauts maximum) avec un coût d'infrastructure minimal. C'est une solution économique pour les réseaux où la centralisation est souhaitable et où le noeud central peut être bien sécurisé.

Topologie en arbre
Liens: 63, Nœuds: 64
Redondance: 1.00

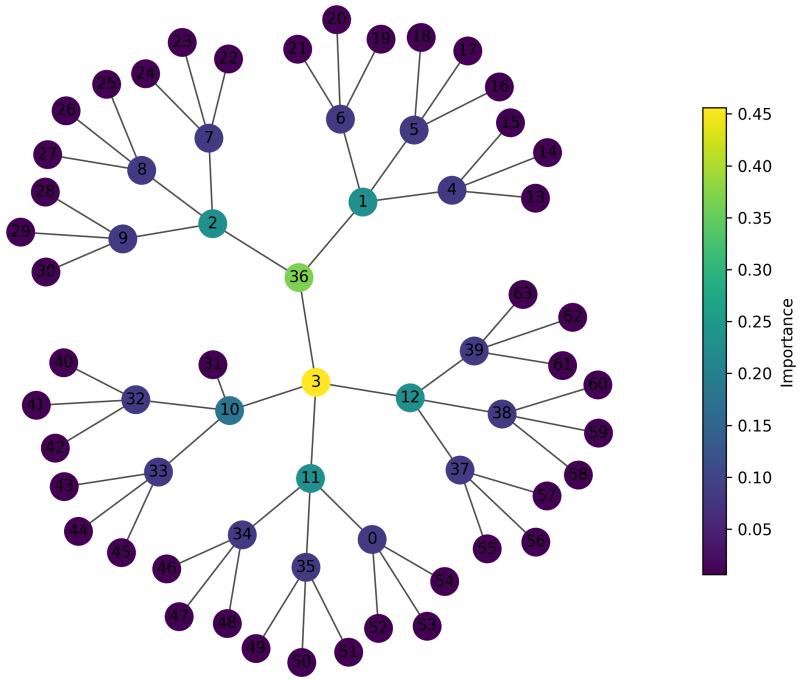


Figure 7: Topologie en arbre

La topologie en arbre présente une structure hiérarchique avec une redondance minimale (1.00) et une distribution d'importance reflétant les différents niveaux hiérarchiques. Le noeud 3 ainsi que les noeuds des niveaux supérieurs (représentés en vert-jaune) possèdent une importance significativement plus élevée que les noeuds feuilles (en violet). Il est intéressant de noter que, contrairement à ce qu'on pourrait intuitivement penser, le noeud racine (36) n'est pas nécessairement le noeud le plus important de cette topologie.

Comme l'étoile et la ligne, l'arbre utilise le nombre minimal de liens (63), mais offre une hiérarchie adaptée à plusieurs applications réelles. Cette structure permet une administration centralisée avec délégation progressive, ce qui la rend efficace pour les réseaux d'entreprise.

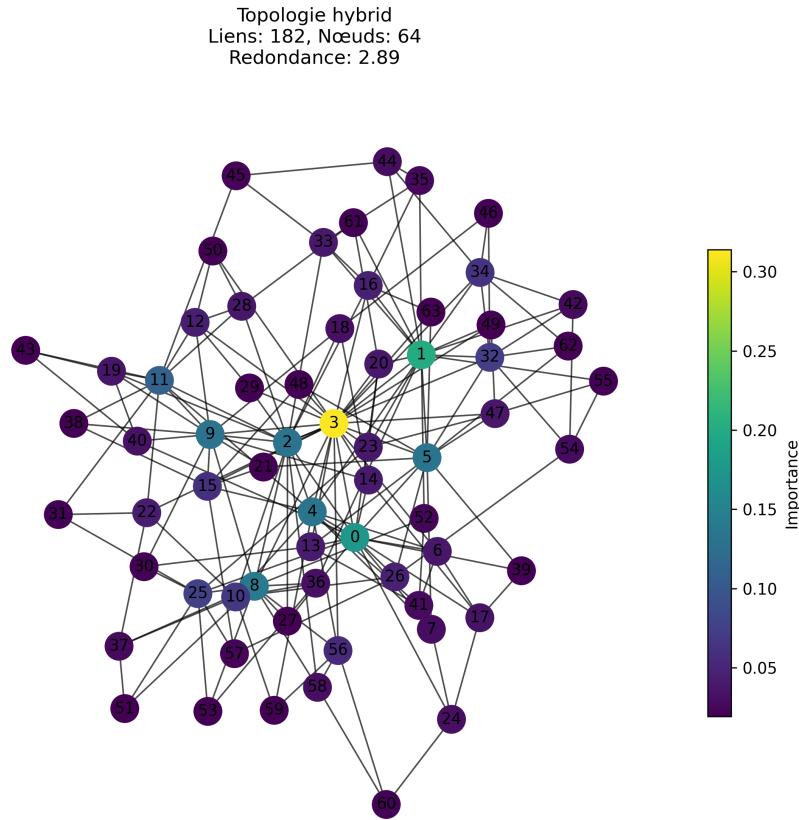


Figure 8: Topologie simulant un cas réel (Algorithme de Holme et Kim)

La topologie hybride (utilisant l'algorithme de Holme-Kim) simule un réseau réel avec des propriétés d'attachement préférentiel et de clustering. Cette structure, avec ses 182 liens offrant une redondance de 2.89, se caractérise par la présence d'un nœud central qui joue un rôle critique puisque de nombreux chemins optimaux du réseau passent par celui-ci.

Avec 182 liens (2.89 fois le minimum), cette topologie est parmi les plus coûteuses, dépassée seulement par la grille++. Cependant, elle offre un bon rapport coût-performance en combinant une haute redondance avec un diamètre de réseau réduit. Ces caractéristiques expliquent pourquoi les réseaux réels comme Internet évoluent naturellement vers ce type de structure.

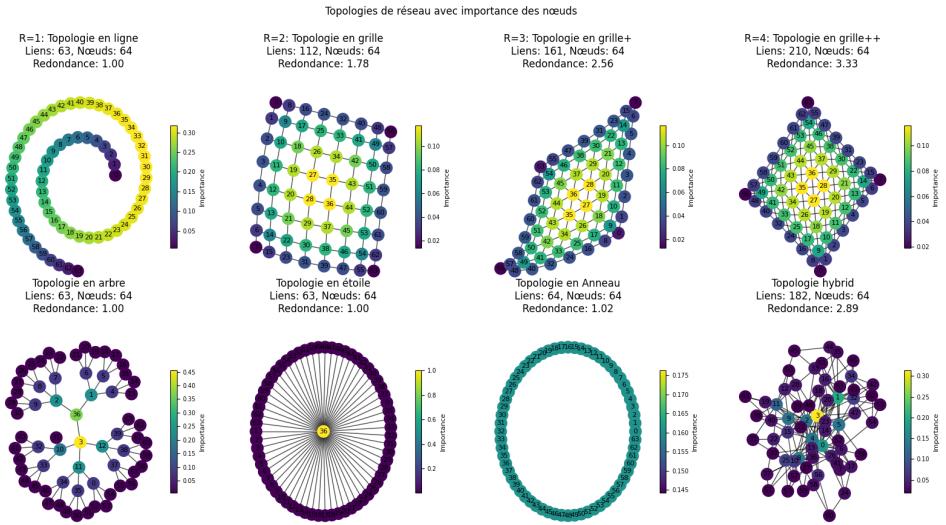


Figure 9: Toutes les topologies

En classant les topologies par ordre croissant de coût (nombre de liens):

Coût	Topologies et (Redondance)
Coût minimal (63 liens)	Ligne, Étoile, Arbre - Topologies à redondance minimale ($R=1.00$)
Coût quasi-minimal (64 liens)	Anneau - Redondance légèrement améliorée ($R=1.02$)
Coût moyen (112 liens)	Grille - Bonne redondance ($R=1.78$)
Coût élevé (161 liens)	Grille+ - Très bonne redondance ($R=2.56$)
Coût très élevé (182 liens)	Hybride - Excellente redondance avec propriétés de petit monde ($R=2.89$)
Coût maximal (210 liens)	Grille++ - Redondance maximale ($R=3.33$)

Table 1: Classification des topologies selon le coût et la redondance

Cette progression montre clairement la loi du rendement décroissant : chaque augmentation de redondance nécessite proportionnellement plus de liens que la précédente. Le choix optimal dépend donc du contexte spécifique et de l'équilibre recherché entre coût d'infrastructure et résilience du réseau.

2.2 Résultats des simulations de pannes

2.2.1 Pannes de noeuds

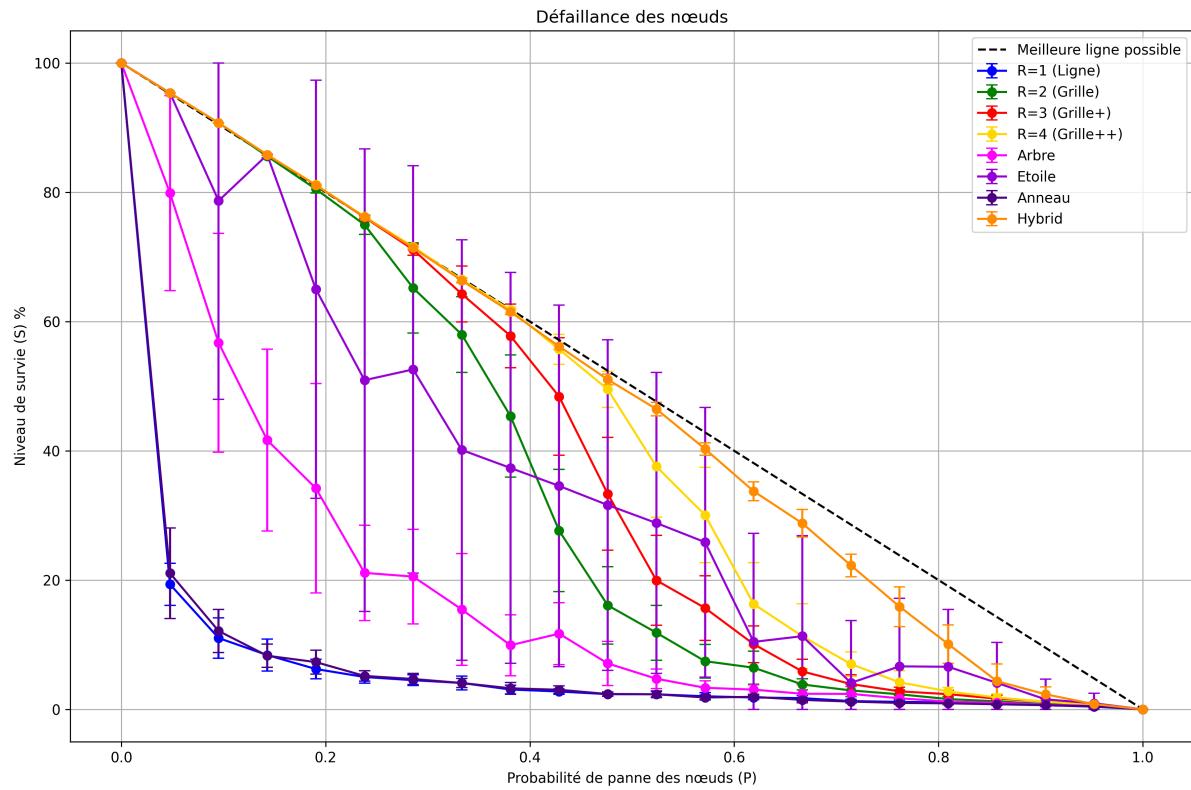


Figure 10: Résultats de la simulation de panne de noeuds

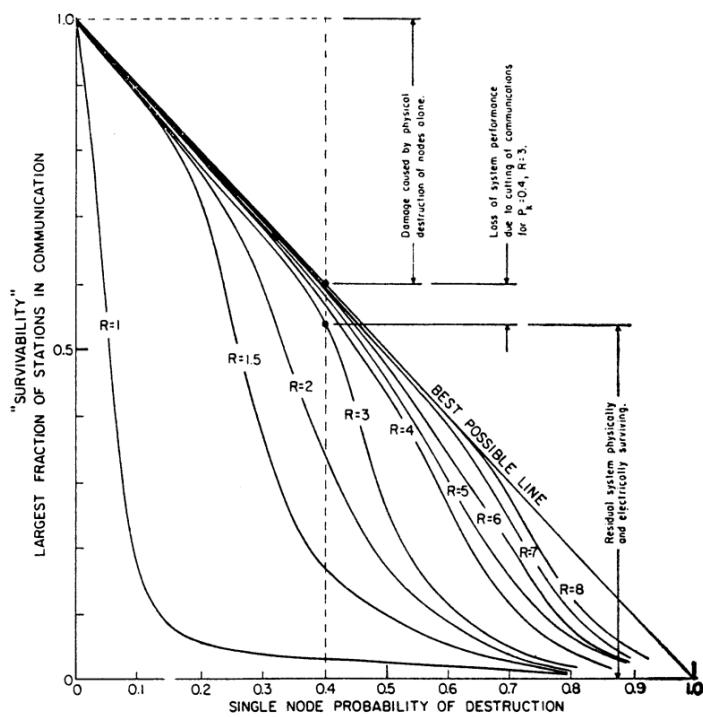


Figure 11: Résultats de la simulation de panne de noeuds de Baran

La comparaison des résultats obtenus (Figure 10) avec ceux de Baran (Figure 11) montre une forte similitude, ce qui valide la méthodologie de simulation utilisée. L'analyse des défaillances de noeuds met en évidence des comportements différents selon les types de topologies testées.

Les topologies à faible redondance (ligne, anneau, $R=1$) se montrent très vulnérables : leur connectivité diminue rapidement dès les faibles probabilités de panne. Cette fragilité s'explique par le manque de chemins alternatifs disponibles quand un noeud tombe en panne.

La topologie en étoile présente un cas particulier. Ses résultats varient considérablement selon que le noeud central est touché ou non. Si ce noeud reste fonctionnel, le réseau maintient une bonne connectivité, mais sa défaillance entraîne un effondrement complet du réseau. Les variations observées sont également liées au nombre limité de simulations effectuées.

À l'opposé, les topologies fortement redondantes comme la grille++ ($R=4$) et la topologie hybride démontrent une meilleure résistance. Elles conservent une bonne connectivité jusqu'à des probabilités de panne d'environ 0,6, se rapprochant de la courbe théorique optimale. La topologie hybride se distingue particulièrement pour les probabilités élevées (supérieures à 0,5), où elle surpasse toutes les autres configurations. Cette performance s'explique par sa structure inspirée des réseaux de communication réels.

2.2.2 Pannes de liens

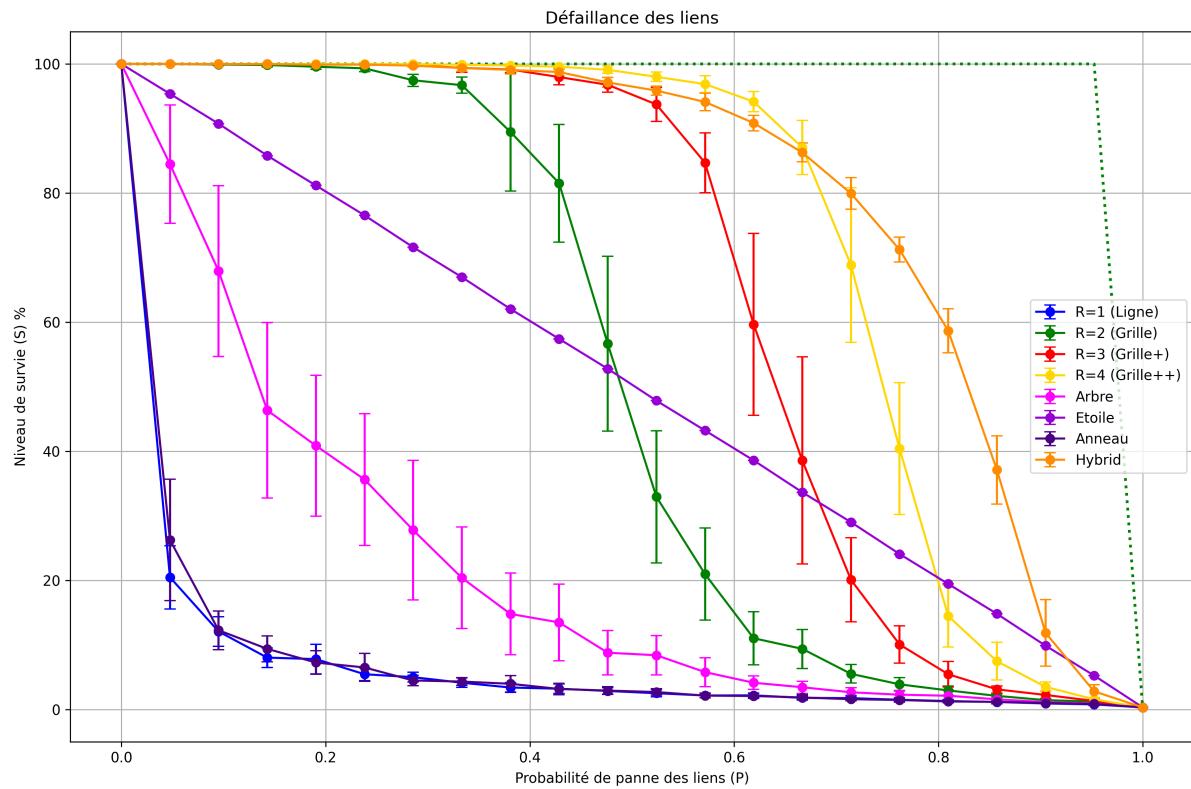


Figure 12: Résultats de la simulation de panne de liens

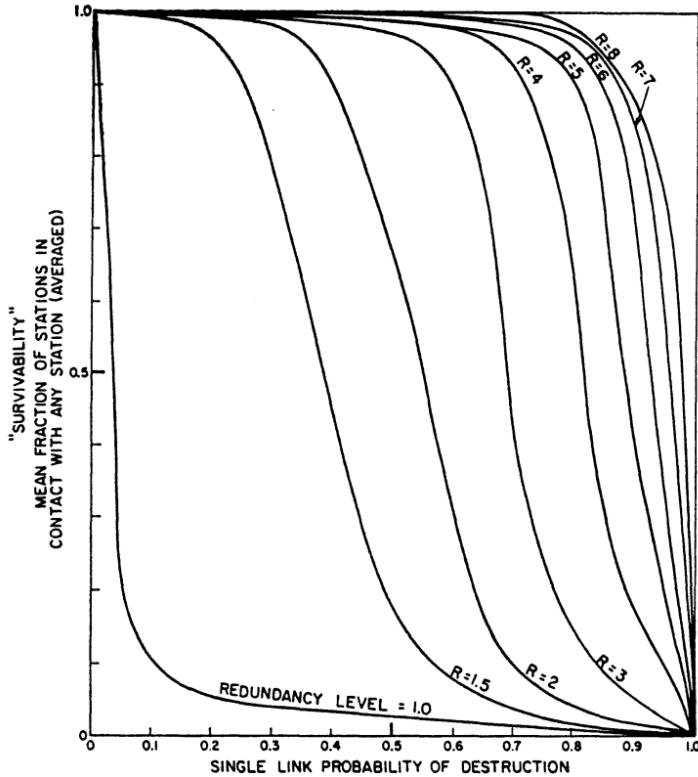


Figure 13: Résultats de la simulation de panne de liens de Baran

À nouveau, la comparaison des résultats obtenus (Figure 12) avec ceux de Baran (Figure 13) révèle une forte corrélation, validant cette partie de la simulation.

Les différences entre topologies apparaissent encore plus nettement que lors des pannes de noeuds. On observe un plateau initial pour les topologies à haute redondance (grille++, grille+, hybride) qui maintiennent un taux de survie proche de 100% jusqu'à certains seuils : environ 0,6 pour la grille+, et 0,7 pour la grille++ et la topologie hybride. Ce plateau s'explique par la présence de nombreux chemins alternatifs qui compensent la perte de liens.

La ligne théorique optimale en pointillés verts indique le maximum possible de survie, que les topologies très redondantes parviennent à approcher efficacement.

La topologie en étoile présente une dégradation linéaire face aux pannes de liens, contrairement à son effondrement rapide face aux pannes de noeuds. Cette différence s'explique par le fait que chaque lien perdu isole uniquement un noeud périphérique, sans affecter les autres connexions.

Les barres d'erreur sont généralement plus importantes pour les structures avec des points de défaillance critiques (étoile, arbre) et pour les probabilités de panne intermédiaires, ce qui indique une plus grande variabilité des résultats selon les éléments spécifiques touchés par les pannes aléatoires.

La comparaison entre les deux types de pannes montre que toutes les topologies résistent mieux aux défaillances de liens qu'aux défaillances de noeuds. Cette observation est logique puisque la perte d'un noeud entraîne également la perte de tous ses liens connectés. Ce

phénomène est particulièrement visible pour les topologies à haute redondance, qui parviennent à maintenir la connectivité malgré des taux élevés de défaillance de liens.

3 Incertitudes Expérimentales

Les principales sources d'incertitude dans cette étude incluent la précision de la méthode Monte-Carlo ainsi que les variations aléatoires dans la simulation des pannes, accentuées par le nombre limité de simulations effectuées.