

# Comprendre, mesurer et renforcer la résilience d'un système en cas de crise humanitaire

Aurélie Charles, Guillaume Bouleux, Giacomo Kahn

## 1 Introduction

Dans ce projet, notre principal objectif est de travailler sur la résilience des sociétés. Ce projet se focalise sur un type de perturbation : la survenue d'une catastrophe naturelle de grande ampleur (tremblement de terre, inondation, tempête...). Nous proposons de représenter le système de réponse aux crises sous la forme d'un **réseau multicouches** où les nœuds représentent les entités (ville, entrepôt, hôpital, aéroport...) et les liens matérialisent leurs connections (routes, liaisons aériennes...).

Le cœur de ce projet s'articule autour de la **robustesse** des systèmes complexes et de leur **résilience** face à différents types de perturbations ou attaques, permettant l'anticipation puis la réponse la plus efficace lors d'une crise. Cette proposition scientifique trouve écho dans les questionnements actuels de plusieurs ONG, notamment Handicap International avec laquelle nous avons une collaboration proche.

## 2 La robustesse : principe et cas multicouches

### 2.1 Robustesse de réseaux

Afin d'éviter qu'un système n'ait plus la capacité de remplir ses objectifs fonctionnels, il est primordial d'identifier quelles en sont ses fragilités. Lorsque le système est modélisé sous une forme de réseau (ou de réseau de réseaux), cette notion correspond à celle de la robustesse. Caractériser la robustesse d'un réseau a été abordé depuis des décennies maintenant sous différents aspects et hypothèses.

Les premières recherches fondatrices [2, 1] se sont tout d'abord intéressées à caractériser la robustesse d'un réseau sous l'hypothèse que chacune des interactions (liens) dans le réseau sont unitaires, c'est-à-dire de même capacité (ou de même poids). Ensuite, par destruction aléatoire de nœuds (ou de lien) dans le réseau, la plus grande composante connexe est étudiée [12]. La disparition brutale de cette plus grande composante connexe au cours des destructions identifie un changement de phase dans le système appelé indice de percolation [11], illustré par la Figure 1.

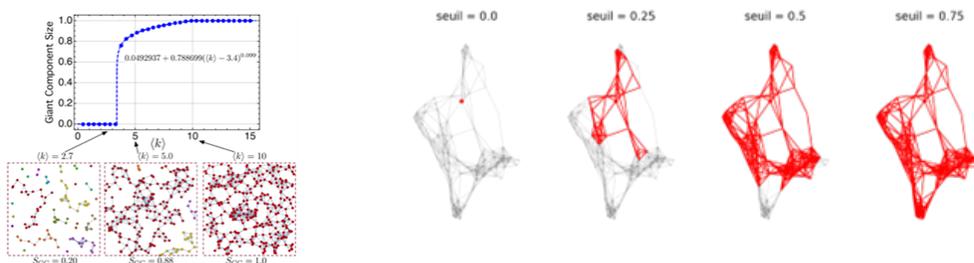


FIGURE 1 – Percolation [11] et *first-passage percolation* [7].

À cette idée de robustesse topologique s'opposent d'autres approches qui prennent plus partie d'un indice lié au flot transporté dans le réseau. Le flot peut représenter des voyageurs transitant par avion, train, route ou peut aussi être assimilé à une capacité de transport ou un temps de transport. L'indice de robustesse est alors plus en adéquation avec la fonction du système qui peut résister aux attaques même si certains liens ont disparu. Cela donne plus de sens à une réalité fonctionnelle et la quantité d'intérêt, relative au flot, est celle des plus courts chemins.

Jusqu'ici, les attaques aléatoires et la destruction des liens dans le réseau sont les hypothèses qui permettent d'inférer sur la robustesse. Pour donner encore plus de sens à une réalité opérationnelle, il est possible de considérer non plus des attaques aléatoires mais des attaques ciblées, d'ailleurs la plupart des travaux récents proposent une double analyse à des fins d'exhaustivité. Ainsi, la robustesse est étudiée en fonction de différents scénarios d'attaques. Les nœuds cibles pour les attaques peuvent être les nœuds de plus fortes centralités (intermédiarité, degrés, proximité, etc.), les nœuds ciblés peuvent aussi être ceux ayant des dépendances fortes (effet cascade dans la distribution de l'énergie, de l'eau, etc). Dans un scénario de catastrophe naturelle, seront par contre préférés, les nœuds les plus proches géographiquement (cas d'un tremblement de terre [3], inondation [16]).

L'hypothèse de destruction totale des liens pour la caractérisation de la robustesse peut également être relaxée. Les liens ne sont plus systématiquement détruits mais peuvent être dégradés seulement. Ce paradigme a donné naissance à deux axes thématiques, «l'average network flow (ANF) [14]» et le «First Passage Percolation (FPP) [7]» qui reprennent tous deux l'idée du flot dans le réseau. L'indicateur de robustesse ANF est définie comme la valeur moyenne des flux maximum circulant entre tous les nœuds sources et destinations du réseau (Figure 1).

Ces approches permettent clairement de donner une idée de la structure interne du réseau par leur capacité plus au moins importante et rapide à transmettre un flux pour toute source et toute destination. Dans un contexte de gestion de crise, cela permet de savoir si les aides aux populations atteintes pourront être acheminées rapidement ou non. L'étude du FPP ne fait pas état des changements structurels du réseau à la suite d'une attaque ou d'une dégradation/amélioration dynamique du réseau.

**Objectif 2.1.** Nous souhaitons donc combler ce manque dans la littérature en proposant un indicateur fonction du FPP en s'inspirant des indicateurs déjà proposés pour cette approche tout en tenant compte de l'état du réseau (ses nœuds, ses liens dégradés ou détruits) issue de la théorie classique de la percolation.

## 2.2 La robustesse dans le cas multicouches

Un objectif scientifique majeur pour le projet réside dans la compréhension de la robustesse pour un réseau de type multicouches [multilayer networks] comme illustré par la Figure 2. Si certains ont déjà abordé cette question, la littérature reste encore frugale à ce sujet. Bien sûr, nous pouvons imaginer généraliser l'ensemble des techniques et indicateurs précédemment présentés comme par exemple les indicateurs d'efficiency ou de Laplacien [9]. C'est aussi ce que proposent les premières propositions d'indicateurs qui analysent la robustesse de réseaux multicouches de synthèses comme les réseaux Erdős-Rényi (ER) ou Barabási Albert (BA) couplés [10]. Les réflexions proposées dans cet article étendent les conclusions déjà connues sur la robustesse de ces réseaux en caractérisant la plus grande composante connexe du réseau multicouches dans sa totalité. Différentes stratégies de destruction des liens inter-couches sont étudiées pour mesurer les impacts sur la robustesse. Cela semble peu applicable dans le cas d'un réseau multicouches de données hétérogènes dont la sémantique des liens porte une information cruciale. La réflexion portée par [8], illustrée Figure 2, bien que de prime abord séduisante par sa modélisation et son contexte proche de celui que nous souhaitons étudier, définit la robustesse d'un réseau multicouches de données hétérogènes par simplement le ratio de la somme du nombre de nœuds et de liens restant pour chaque couche après attaque par rapport aux nombre total de nœuds et de liens initiaux. Une fois encore, cette notion topologique directe du réseau dans un contexte de destruction des liens est utilisée, n'apportant, à notre sens, pas une information pertinente.

**Objectif 2.2.** Nous proposons d'aborder la problématique de robustesse sous l'angle du flux transporté dans le réseau en exploitant l'indicateur proposé précédemment mais en modifiant au préalable la structure du réseau. À partir des études de «k-core» percolation [4, 17], nous proposons de classifier les acteurs et éléments du réseau en fonction de leur sémantique et ainsi reconstruire un réseau multicouches cohérent.

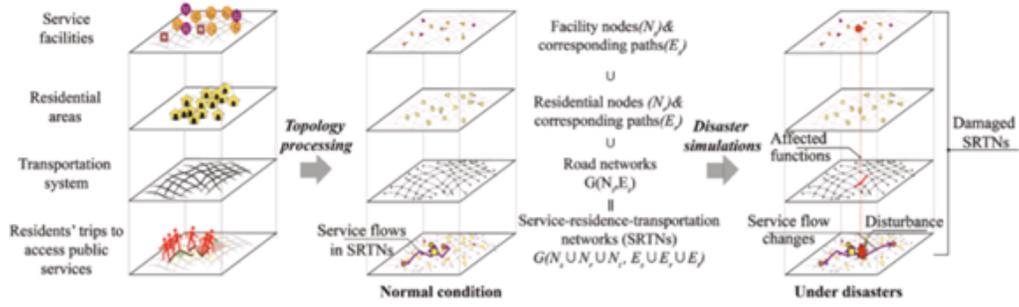


FIGURE 2 – Robustesse d’une réseau multi-couche de données hétérogènes [8].

### 3 La résilience : principe et cas multicouches

Pour nous, la notion de résilience pour un système suit les principes suivants. Le système subit d’abord des attaques ou des perturbations, et en fonction de sa robustesse plus ou moins importante, sa fonctionnalité se dégrade d’autant. La résilience est alors la phase qui suit directement les dégradations et pendant laquelle les actions menées doivent conduire à ce que le système retrouve un niveau acceptable de fonctionnalité le plus rapidement. Nous nous intéressons à l’axe théorique de la résilience s’appuyant pleinement sur des concepts mathématiques et physiques. La notion de résilience est abordée par l’aspect dynamique [6]. La topologie complète du réseau est utilisée pour inférer une fonction de résilience qui permet de distinguer les zones où la dynamique du réseau complexe permettrait de revenir plus ou moins facilement vers un état stable (sa fonctionnalité). C’est en directe lignée avec les approches de systèmes dynamiques pour lesquels les points critiques du système sont identifiés et les trajectoires dynamiques y menant, caractérisées. Une autre grande thématique théorique intéressante concerne le concept de « rewiring » [17] ou de « rewiring » aléatoire. Cette méthode autorise la construction dynamique d’un réseau pour qu’une information, un flux, puisse circuler au mieux [18]. Dans la même optique, le concept de « message passing » est utilisé pour améliorer la capacité du réseau à distribuer plus ou moins rapidement un flux. Or, de récents travaux s’intéressent à la représentation géométrique du réseau en calculant la courbure du réseau [5]. La courbure de Ricci semble être l’indicateur émergent [13] et est utilisé pour caractériser les endroits du réseau qui engorgent le passage du flux. C’est le concept de « over-squashing » introduit dans [15]. Une illustration de cette représentation géométrique du réseau et de son intérêt pour la résilience est donnée en Figure 3. En effet, il est possible de dynamiquement modifier les interactions de manière à moins isoler certaines communautés. Si nous observons la représentation du modèle multicouches après le tremblement de terre d’Haïti en 2010 [3], nous constatons l’isolement de certaines villes. Pour mener au mieux les opérations d’aide humanitaire, le concept de rewiring associé aux travaux de [15] pourront être utilisés.

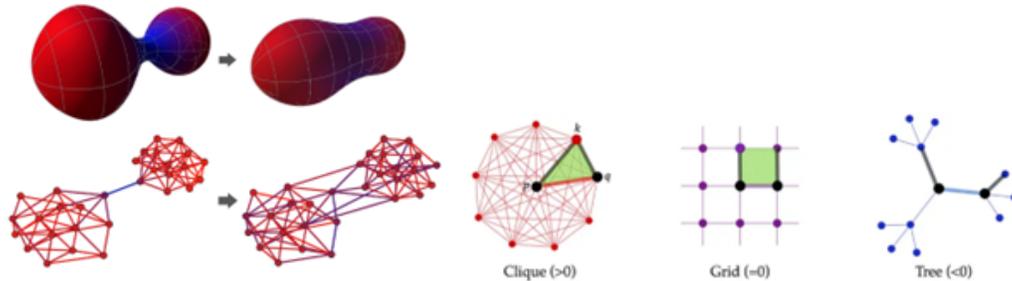


FIGURE 3 – Process of curvature-based graph rewiring [8].

**Objectif 3.1.** Proposer une définition de résilience dans un contexte multicouches, appropriée à l’application humanitaire et valable sur le plan théorique.

## 4 Conclusion

Ce sujet de master offre la possibilité de travailler sur des questions de recherche ayant un intérêt théorique et une utilité sociétale. Il est proposé dans le cadre du lancement d'un projet ANR, ResHI. Une thèse dans la continuité de ces travaux est proposée par la suite, toujours en partenariat avec Handicap International.

## Références

- [1] Oriol Artime, Marco Grassia, Manlio De Domenico, James P Gleeson, Hernán A Makse, Giuseppe Mangioni, Matjaž Perc, and Filippo Radicchi. Robustness and resilience of complex networks. *Nature Reviews Physics*, 6(2) :114–131, 2024.
- [2] Simon R Broadbent and John M Hammersley. Percolation processes : I. crystals and mazes. In *Mathematical proceedings of the Cambridge philosophical society*, volume 53, pages 629–641. Cambridge University Press, 1957.
- [3] Aurelie Charles, Guillaume Bouleux, and Chantal Cherifi. Understanding the situation at a glance : The powerful value added of complex networks to analyse humanitarian operations. *International journal of disaster risk reduction*, 75 :102932, 2022.
- [4] Sergey N Dorogovtsev, Alexander V Goltsev, and Jose Ferreira F Mendes. K-core organization of complex networks. *Physical review letters*, 96(4) :040601, 2006.
- [5] Hamza Farooq, Yongxin Chen, Tryphon T Georgiou, Allen Tannenbaum, and Christophe Lenglet. Network curvature as a hallmark of brain structural connectivity. *Nature communications*, 10(1) :4937, 2019.
- [6] Jianxi Gao, Baruch Barzel, and Albert-László Barabási. Universal resilience patterns in complex networks. *Nature*, 530(7590) :307–312, 2016.
- [7] John M Hammersley and Dominic JA Welsh. First-passage percolation, subadditive processes, stochastic networks, and generalized renewal theory. In *Bernoulli 1713, Bayes 1763, Laplace 1813 : Anniversary Volume. Proceedings of an International Research Seminar Statistical Laboratory University of California, Berkeley 1963*, pages 61–110. Springer, 1965.
- [8] Jingjing Kong, Slobodan P Simonovic, and Chao Zhang. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems : a case study based on different response strategies. *Sustainability*, 11(23) :6552, 2019.
- [9] Rajesh Kumar, Suchi Kumari, and Anubhav Mishra. Robustness of multilayer networks : A graph energy perspective. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 628 :129160, 2023.
- [10] Rajesh Kumar and Anurag Singh. Robustness in multilayer networks under strategic and random attacks. *Procedia Computer Science*, 173 :94–103, 2020.
- [11] Ming Li, Run-Ran Liu, Linyuan Lü, Mao-Bin Hu, Shuqi Xu, and Yi-Cheng Zhang. Percolation on complex networks : Theory and application. *Physics Reports*, 907 :1–68, 2021.
- [12] Mark EJ Newman. The structure and function of complex networks. *SIAM review*, 45(2) :167–256, 2003.
- [13] Areejit Samal, RP Sreejith, Jiao Gu, Shiping Liu, Emil Saucan, and Jürgen Jost. Comparative analysis of two discretizations of ricci curvature for complex networks. *Scientific reports*, 8(1) :8650, 2018.
- [14] Weisheng Si, Balume Mburano, Wei Xing Zheng, and Tie Qiu. Measuring network robustness by average network flow. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 9(3) :1697–1712, 2022.
- [15] Jake Topping, Francesco Di Giovanni, Benjamin Paul Chamberlain, Xiaowen Dong, and Michael M Bronstein. Understanding over-squashing and bottlenecks on graphs via curvature. *arXiv preprint arXiv :2111.14522*, 2021.
- [16] Kees CH van Ginkel, Elco E Koks, Frederique de Groen, Viet Dung Nguyen, and Lorenzo Alfieri. Will river floods ‘tip’ european road networks? a robustness assessment. *Transportation research part D : transport and environment*, 108 :103332, 2022.

- [17] Hui Xia. Improve the resilience of multilayer supply chain networks. *Complexity*, 2020(1) :6596483, 2020.
- [18] Zhuojie Zhou, Nan Zhang, Zhiguo Gong, and Gautam Das. Faster random walks by rewiring online social networks on-the-fly. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 40(4) :1–36, 2016.