

## APPEL À PROJETS 2026 – PROJETS *BLANCS*

|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| Titre   | <b>ResiNet</b> : Risk zoning and rESIlient routing for urban elastic optical inter-Data-Center NETworks  |   |   |
| Acronyme  | <b>ResiNet</b>   |   |   |
| Porteur/porteuse  | Prénom & nom : Fen Zhou<br>Laboratoire : LIA   |   |   |
| Gestionnaire du laboratoire                                 | Prénom & nom : Michele MANEN<br>Courriel : michele.manen@univ-avignon.fr   |   |   |
| Liste exhaustive des participant·es identifié·es            | Prénom & nom<br>Didier Josselin<br>Mohamed Madani  | Laboratoire<br>UMR ESPACE<br>CERI SN, IMT Nord Europe | Courriel<br>didier.josselin@cnrs.fr,<br>mohamed.madani@imt-nord-europe.fr |
| Budget demandé  | 8000 €   |   |   |
| Résumé<br><br><i>Max. 1 000 caractères, espaces compris</i> | <p>Les réseaux élastiques optiques inter-centres de données (EO-DCNs), bien qu'offrant une grande efficacité spectrale et une capacité de bande passante considérable, sont particulièrement vulnérables aux catastrophes naturelles à grande échelle, telles que les tremblements de terre et les inondations, qui peuvent endommager les infrastructures et perturber les services de communication. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité de ces catastrophes représente un défi majeur pour la résilience de ces réseaux. Ce projet interdisciplinaire aborde ce défi par une approche en deux phases : d'abord, l'application de <b>méthodologies géographiques rigoureuses</b> pour identifier précisément les <b>zones à risque et vulnérables</b> ; ensuite, le développement de <b>stratégies efficaces en termes de ressources pour la protection contre les pannes liés aux catastrophes naturels dans EO-DCNs</b>, afin de minimiser les interruptions de service lors des événements catastrophiques. Cette approche repose sur la maîtrise des flux de données massives via la résilience des réseaux à l'interface infrastructures de données numériques / population et s'inscrit ainsi parfaitement dans les objectifs de la FR Agorantic.</p> |   |   |

### 1. Contexte & positionnement

Les catastrophes naturelles, qu'elles soient prévisibles (par exemple les inondations) ou imprévisibles (comme les séismes), causent des destructions massives et d'importantes pertes humaines. Par exemple, en octobre 2024, une dépression isolée de haute altitude (DANA) a frappé l'est de l'Espagne, provoquant des intempéries extrêmes, des crues soudaines et des conséquences tragiques, avec 224 morts et 13 personnes portées disparues [1]. De même, la France est exposée à des risques d'inondations majeurs, avec près d'un tiers de ses communes potentiellement concernées. La tempête Xynthia en février 2010 demeure l'une des catastrophes naturelles les plus dévastatrices du pays, causant 52 décès, des dégâts matériels considérables, et l'inondation de plus de 50 000 hectares [2]. Ces événements soulignent le besoin urgent de renforcer la résilience face aux catastrophes en Europe, d'autant plus que le changement climatique continue d'augmenter la fréquence et l'intensité de ces phénomènes [1].

**Les réseaux de télécommunications urbains**, tels que les réseaux optiques élastiques inter-centres de données (EO-DCNs) [3-8], sont particulièrement vulnérables aux catastrophes naturelles à grande échelle comme les tremblements de terre et les inondations. Ces événements peuvent endommager gravement l'infrastructure, entraînant des défaillances permanentes des nœuds et des liens du réseau [3-9,16]. La

fréquence et l'intensité croissantes de ces catastrophes posent des défis majeurs pour la résilience des réseaux. Ces défaillances provoquent souvent des coupures d'électricité généralisées dans les centres de données et détruisent des antennes relais, perturbant ainsi les services de télécommunications et de cloud. Des interruptions de service peuvent priver des millions de personnes d'accès à Internet, affectant les activités économiques et des services essentiels comme la télémédecine, les systèmes de santé et les réseaux hospitaliers. L'absence de communication fiable pendant les crises complique les opérations de secours, qui dépendent de réseaux robustes pour coordonner efficacement les interventions et bénéficier de systèmes d'alerte efficaces [20]. Par exemple, le séisme de Wenchuan en 2008 (magnitude 8,3) a perturbé plus de 30 000 km de câbles à fibres optiques et affecté 4 000 centres de télécommunications en Chine [6]. De même, le séisme et tsunami de 2011 au Japon ont gravement endommagé près de 1 500 bureaux de télécommunications le 11 mars, avec 700 bâtiments supplémentaires touchés lors d'une réplique le 7 avril [8]. L'ouragan Katrina en 2005, a causé des défaillances majeures aux États-Unis, avec des coupures persistantes pendant plus de dix jours en raison de pannes électriques [7]. Face à ces vulnérabilités, renforcer la résilience des systèmes de communication est essentiel pour assurer la continuité des services critiques. L'Union européenne a ainsi développé des stratégies pour la prévention, la préparation et la réponse aux catastrophes. Par exemple, l'Action COST sur les services de communication résilients vise à protéger les applications des utilisateurs contre les défaillances liées aux catastrophes [9].

## 2. Questionnement scientifique & objectifs

Face aux événements catastrophiques, comment renforcer la résilience du réseau afin de minimiser les interruptions de service et la perte de données lors d'une panne à grande échelle devient un problème critique. Ce projet interdisciplinaire aborde ce défi par une approche en deux phases : *d'abord, l'application de méthodologies géographiques rigoureuses pour identifier précisément les zones à risque ; ensuite, le développement de stratégies de protection efficaces en termes de ressources.*

### 2.1 Zonage des Risques de Catastrophes Naturelles pour les EO-DCNs

Un zonage efficace des risques et une prévision précise des catastrophes naturelles sont essentiels pour atténuer les impacts sur les réseaux **EO-DCNs**. Plutôt que d'utiliser des estimations approximatives des **zones sinistrées (DZ)** fréquemment évoquées dans la littérature [3-9, 16], dans ce projet, nous visons à proposer des méthodologies géographiques rigoureuses pour les catastrophes naturelles prévisibles et imprévisibles. Elle exploite des techniques avancées de modélisation et des bases de données spatialisées afin d'améliorer la résilience et les stratégies de réponse. La localisation des populations sera une focale essentielle pour l'identification des risques, croisant vulnérabilité et aléa.

### 2.2 Stratégie de protection dans les Réseaux Optiques Inter-Centres de Données Élastiques

Les **EO-DCNs** font face à de sérieuses menaces posées par des catastrophes de grande ampleur, par exemple, les inondations et les séismes. Une défaillance dans une **DZ** peut affecter plusieurs liens et nœuds sur une large échelle et pendant une période relativement longue. L'interruption des réseaux peut entraîner l'arrêt des services cloud et de distribution de contenu, ce qui est particulièrement coûteux pour les réseaux inter-centres de données. Chaque minute d'indisponibilité d'un serveur de centre de données peut causer des pertes financières très importantes (de l'ordre de plusieurs milliers de \$), et une paralysie du réseau due à une catastrophe peut engendrer des pertes de plusieurs milliards de dollars. Compte tenu de la gravité des conséquences des catastrophes, il est impératif de développer des méthodes de protection pour assurer des **communications de bout en bout** dans les EO-DCNs. En se basant sur les zones sinistrées identifiées lors de la première phase, la seconde phase se concentre sur les **mécanismes de Protection Proactive** : Pré-allocation de chemins de transmission alternatifs et de centres de données de secours pour se protéger contre les défaillances causées par des catastrophes.

## 3. Méthodologie

### 3.1 Zonage des Catastrophes Naturelles et Impacts sur les EO-DCN

Les catastrophes naturelles prévisibles comme les inondations, peuvent être anticipées grâce aux données météorologiques et hydrologiques, permettant ainsi des stratégies de gestion proactive et de protection des réseaux. Ces événements prévisibles nécessitent une préparation avancée qui peut être optimisée par des modèles précis de zonage des risques et d'évaluation des impacts. Les catastrophes naturelles imprévisibles, en particulier les séismes, posent aussi un défi majeur à la résilience des EO-DCNs. L'apparition soudaine de ces événements, combinée à leurs impacts étendus et souvent encascade, exige des techniques avancées de zonage et de modélisation prédictive pour garantir la robustesse des réseaux. Pour les évaluations des risques d'inondations et des risques des séismes, nous avons identifié les 5 bases de données : (1) Vigicrues (France)[10] ; (2) European Flood Awareness System ; (3) United States Geological Survey [12] ; (4) European-Mediterranean Seismological Center; (5) Global Seismic Hazard Assessment Program [14].

Les modèles hydrologiques simulent les écoulements fluviaux et les précipitations [13]. Les méthodes d'apprentissage automatique peuvent enrichir ces modèles en traitant de vastes volumes de données, y compris des données hydrologiques, des alertes de risques d'inondation [11, 15], et des contenus issus des réseaux sociaux pour suivre en temps réel les impacts des inondations [8, 20]. Les modèles de risques sismiques déterministes analysent les failles connues et les données historiques pour prédire des scénarios spécifiques de séismes, tandis que les modèles probabilistes évaluent l'activité sismique régionale pour estimer la probabilité d'un séisme dans une zone donnée. Ces modèles permettent de définir les **Groupes de Liens à Risque Partagé** (SRLGs) dans les EO-DCNs, essentiels pour concevoir des infrastructures résilientes face aux perturbations sismiques. Les zones à risque évoluent en fonction de la magnitude du séisme et des caractéristiques régionales. Intégrer des cartes de risques sismiques aux topologies des EO-DCNs permet d'identifier les liens vulnérables et d'optimiser les mesures de préparation proactive [4, 8, 13].

En combinant des techniques précises de zonage des catastrophes exploitant des bases de données mondiales, nous allons identifier les DZs pertinentes, les SRLGs, ainsi que les alertes d'inondation sur des topologies EO-DCN classiques telles que **Cost-239**, **US Backbone**, **NSFNET**, **GEANT**, **topologie allemande** et **Tokyo** [3-8,16], largement utilisées pour les simulations. Ces efforts constituent la base pour développer des stratégies efficaces de **protection**, discutées dans les sections suivantes.

### 3.2 Stratégie de Protection dans les EO-DCNs avec Modélisation Prédictive des Risques

Grâce aux résultats obtenus lors de la phase de zonage des catastrophes, en tirant parti des expertises des collègues en géographie du laboratoire UMR ESPACE<sup>1</sup>, les zones de catastrophe sont identifiées et modélisées à l'avance (de manière déterministe ou probabiliste). Dans cette phase de recherche, on se concentre sur les mécanismes de Protection Proactive dans les EO-DCNs : Pré-allocation de chemins de transmission alternatifs et de centres de données de secours pour se protéger contre les défaillances causées par des catastrophes.

Une approche proactive traditionnelle consiste à fournir une paire de chemin optique primaire et de secours pour chaque connexion de bout en bout, de manière à ce que les chemins primaire et de secours

<sup>1</sup> Johnny Douvinet, Professeur à ESPACE à Avignon Université, expert sur l'alerte et Pierre-Alain Ayral, ingénieur CNRS d'ESPACE maîtrisant la thématique des crues éclair (terrain d'analyse : les Cévennes)

soient routés dans deux groupes de risque partagé disjoints (SRLGs) [4,5,8]. De cette manière, les deux chemins ne seront pas simultanément perturbés en cas de séisme. Cependant, cette approche peut nécessiter un sur-approvisionnement en bande passante très élevé, ce qui peut devenir économiquement insoutenable. C'est pourquoi l'approvisionnement sensible aux catastrophes (DAP) est introduit [4]. Pour activer le DAP, il faut d'abord identifier les régions à faible ou aucun risque du réseau grâce aux résultats obtenus lors de la phase de zonage des catastrophes. Ensuite, les connexions les plus importantes sont routées le long des régions à faible risque du réseau afin de réduire le risque de perturbations (et les pénalités résultant de la perte de données) en cas de catastrophe, sans nécessairement utiliser de chemin de secours. De plus, la possibilité de répliquer des informations sur plusieurs centres de données (DCs) et la virtualisation des services à différents emplacements offrent de nombreuses opportunités pour un approvisionnement résilient face aux séismes en déployant une protection coopérative des chemins de secours de bout-en-bout. En conséquence, le concept de stockage coopératif (CSS) entre les DCs [3] et le routage multi-chemins résilients [16] via le Manycasting depuis plusieurs DCs est une approche intéressante pour minimiser l'utilisation des ressources afin de protéger les chemins de routage traversant les zones de risque de catastrophe. Cependant, tant le CSS que le Manycasting ajoutent une dimension d'optimisation pour minimiser les ressources du réseau dans les EO-DCN, où des techniques d'optimisation (ILP, heuristique, *Column Generation*, ou *Deep Reinforcement Learning*) joueront un rôle important.

#### 4. Résultats attendus et caractère innovant de la recherche

(1) Définir des zones de panne à grande échelle provoquées par des catastrophes naturelles pour différentes topologies de réseau, et créer des bancs d'essai (testbeds) pour évaluer la performance en matière de résilience : **Topologies de réseaux optiques** : COST-239, US Backbone, NSFNET ; **Topologies de réseaux académiques** : RENATER (France), GÉANT (Europe) ; **Autres topologies** : Réseau allemand , Tokyo (2) Concevoir et implémenter une méthode de **protection proactive** dans les **EO-DCN** (optical Data Center Networks) ; (3) Rédiger un article à soumettre dans une **conférence internationale**, et éventuellement finaliser un article pour la **revue TNSM** dans le cadre de la thèse de M. Madani.

#### 5. Dimension interdisciplinaire

Pour atteindre avec succès les objectifs de ce projet, l'expertise en évaluation géographique des risques et en optimisation de la résilience des réseaux est essentielle. **L'équipe de recherche est composée de Didier Josselin (DR CNRS) du laboratoire UMR ESPACE et de Fen Zhou (MCF-HDR) du laboratoire LIA, dont les compétences complémentaires permettront d'avancer le projet.** Didier Josselin, chercheur CNRS à ESPACE a une expertise en géographie quantitative, systèmes de transport urbain, Système d'information géographique et évaluation multi-critère ; il travaillera sur une méthodologie géographique rigoureuse pour le zonage des risques de catastrophe, spécifiquement pour les inondations et les séismes dans les réseaux Elastic Optical Inter-DataCenter (EO-DCNs), en s'appuyant sur les compétences des collègues précités. Fen Zhou est spécialisé dans l'optimisation de la résilience des réseaux et le routage. Il a supervisé plusieurs thèses de doctorat sur la résilience des réseaux face aux catastrophes [16-17]. Leur collaboration établie inclut la co-direction de projets de doctorat réussis et l'intégration des connaissances géographiques avec les stratégies d'optimisation des réseaux [18,19]. Ce projet se fera en lien avec les travaux sur l'alerte de Johnny Douvinet [20], dans le cadre de son IUF, qui pourra donner des suggestions intéressantes pour notre projet. Ce projet s'inscrit parfaitement dans plusieurs axes de recherche du FR Agorantic : • **Axe 1 : Méthodologies et interdisciplinarité** • **Axe 4 : Expériences et mises en récit de l'urbain** • **Axe 5 : Structuration et exploitation des corpus (potentiellement)**. Cette approche collaborative renforcera l'impact et la pertinence du projet face aux défis sociétaux pressants liés à la résilience face aux catastrophes et aux infrastructures urbaines, via une gestion intelligente des flux de données numériques et une maîtrise de l'organisation des infrastructures des réseaux.

## 6. Partenariats extérieurs

Les futurs stagiaires auront l'opportunité de collaborer avec l'équipe de recherche dirigée par le professeur **Massimo Tornatore** au *Politecnico di Milano*. Fellow IEEE, le professeur Tornatore est un expert de renommée internationale dans le domaine de la résilience des réseaux face aux catastrophes naturelles. Son expertise approfondie constituera un atout majeur pour le projet Agorantic, en apportant une valeur ajoutée significative à ses développements scientifiques.

Par ailleurs, **M. Mohamed Madani**, actuellement doctorant au **CERI Systèmes Numériques de l'IMT Nord Europe**, sous la co-direction de **M. Fen Zhou**, sera également impliqué dans ce projet. Sa thèse porte sur la protection contre les pannes pour le chaînage de fonctions de service (*Service Function Chaining*) dans les réseaux **5G et au-delà**. Ses travaux de recherche fourniront une base de comparaison pertinente pour les études menées dans le cadre du projet Agorantic.

## 7. Objectifs de pérennisation du projet

Si notre projet de thèse Agorantic et celui-ci sont tous retenus, les nouveaux stagiaires travailleront en collaboration avec le doctorant dans ce projet. Par ailleurs, nous prévoyons de soumettre une proposition dans le cadre d'un projet **Campus France PHC**.

Dans le cas où notre projet de thèse Agorantic 2025 n'aboutirait pas, nous déposerons une demande de financement pour une **thèse Région PACA 2026** ou un **projet de thèse Agorantic pour 2026**. En effet, obtenir un financement permettant le recrutement d'un doctorant est **essentiel** pour mener à bien ce projet ambitieux et stratégique, axé sur l'évaluation des risques et la **résilience des réseaux**.

## 8. Experts suggérés pour l'évaluation du projet

|   |  |
|---|--|
| Expert 1 : Miklos Molnar  | Expert 2 : Ahmed Meddahi   |
| Établissement : LIRMM, Université de Montpellier<br>Domaine : Réseaux, routage et optimisation<br>Courriel : miklos.molnar@lirmm.fr | Établissement : CERI SN, IMT Nord Europe<br>Domaine : Sécurité et résilience et réseaux<br>Courriel : ahmed.meddahi@imt-nord-europe.fr |

## 9. Budget (€) prévisionnel \*

|                                  | Brève description   | Montant |
|----------------------------------|---|---------|
| Missions                         | Participer à une conférence internationale IEEE pour Fen Zhou, et une mission de M. Madani pour venir à Avignon | 2200 €  |
| Consommables, petits matériels** | Petits matériels informatiques et pages supplémentaires revue.  | 400 €   |
| Serveur de calcul                | <b>Serveur pour stoker les données et faire des calculs</b>   | 5000 €  |
| Stages***, vacations             | 1 stage de recherche M2 de 6 mois en informatique et 1 stage M1 de 3 mois en géomatique                         | 5400 €  |
| Budget total                     |   | 13000 € |
| Co financements le cas échéant   | Serveur de calcul CERI (Fen Zhou)   | 5000 €  |
| Budget demandé à Agorantic       |   | 8000 €  |

Mon directeur d'unité est informé du dépôt de ce projet

## 10. Références bibliographiques

- [1]. [https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/news-stories/stories/flash-floods-spain-joining-forces-rapid-recovery\\_en](https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/news-stories/stories/flash-floods-spain-joining-forces-rapid-recovery_en)
- [2]. B. Kolen, R. Slomp, S.N. Jonkman. The impacts of storm Xynthia February 27–28, 2010 in France: lessons for flood risk management. *Journal of flood risk management*, 6(3): s 261-278, 2013
- [3]. Yuanhao Liu, Fen Zhou, Cao Chen, Zuqing Zhu, Tao Shang, Juan-Manuel Torres-Moreno: Disaster Protection in Inter-DataCenter Networks Leveraging Cooperative Storage. *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.* 18(3): 2598-2611 (2021)
- [4]. S. Sedef Savas, M. Farhan Habib, Massimo Tornatore, Ferhat Dikbiyik, Biswanath Mukherjee: Network adaptability to disaster disruptions by exploiting degraded-service tolerance. *IEEE Commun. Mag.* 52(12): 58-65 (2014)
- [5]. H. Honda, H. Saito, Nation-wide disaster avoidance control against heavy rain, *IEEE/ACM Trans. Netw.* 27 (2019) 1084–1097.
- [6]. Y. Ran, Considerations and suggestions on improvement of communication network disaster countermeasures after the Wenchuan earthquake, *IEEE Commun. Mag.* 49 (2011) 44–47.
- [7]. L.K. Comfort, T.W. Haase, Communication, coherence, and collective action: the impact of hurricane Katrina on communications infrastructure, *Publ. Works Manag. Pol.* 10 (2006) 328–3.
- [8]. Jacek Rak, Rita Girão-Silva, Teresa Gomes, Georgios Ellinas, Burak Kantarci, Massimo Tornatore: Disaster resilience of optical networks: State of the art, challenges, and opportunities. *Opt. Switch. Netw.* 42: 100619 (2021)
- [9]. COST Action CA15127 – RECODIS: Resilient communication services protecting end-user applications from disaster-based failures. European Cooperation in Science and Technology. <http://www.cost.eu>.
- [10]. <https://www.vigicrues.gouv.fr>
- [11]. D. Wagenaar, A. Curran, M. Balbi, A. Bhardwaj, R. Soden, E. Hartato, G.M. Sarica, L. Ruangpan, G. Molinario, D. Lallement, Invited perspectives: how machine learning will change flood risk and impact assessment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20 (2020) 1149–1161
- [12]. United States Geological Survey, USGS flood information, accessed June 10, 2020, [https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/usgs-flood-information?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/usgs-flood-information?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects), 2020.
- [13]. A.E. Bandecchi, V. Pazzi, S. Morelli, L. Valori, N. Casagli, Geo-hydrological and seismic risk awareness at school: emergency preparedness and risk perception evaluation, *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 40 (2019) 101280.
- [14]. United States Geological Survey, Long-term national seismic hazard map, 2018, <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/2018-united-states-lower-48-seismic-hazard-long-term>, 2018. (Accessed 10 June 2020).
- [15]. S.M. Shanavas, V.P. Mishra, P. Maheshwari, Global disaster research and threat detection system, in: International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE), United Arab Emirates, Dubai, 2019, pp. 650–655.
- [16]. M. Madani, F. Zhou, A. Meddahi. "Deploying Disaster-Resilient Service Function Chains Using Adaptive Multi-Path Routing. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, pp1-14, 2024.
- [17]. Y. Liu. Enhancing survivability for elastic optical inter-DataCenter Networks. PhD thesis, LIA, Avignon University. 2023.
- [18]. M. Ait Ouahmed. Optimisation dans l'auto-partage à un seul sens avec voitures électriques et relocalisations. PhD thesis, LIA, Avignon University. 2018.
- [19]. M. Mathias. Recommandation de parcours culturels personnalisés : Étude interdisciplinaire de la proposition automatique de visites. PhD thesis, LIA, Avignon University. 2021.
- [20]. J. Douvinet, M. Rakoto, D. Grancher, E. Daudé, R. Moutard. Évaluer le contenu des notifications d'alerte diffusées en France via FR-Alert: enjeux scientifiques et retombées opérationnelles. *NETCOM : Réseaux, communication et territoires / Networks and Communications Studies*, 2024.