



## Introduction

# La résilience des systèmes complexes interdépendants

## Un sujet de plus en plus critique et multi-sectoriel

**A une époque où les sociétés se sont organisées autour d'infrastructures de plus en plus interdépendantes, une défaillance majeure sur l'une peut avoir des effets sur plusieurs autres qui impacteront fortement les personnes et les activités économiques. Cela a conduit à définir des infrastructures dites « critiques » dont la résilience doit être assurée face à des risques – en particulier externes – qui se multiplient (changement climatique, terrorisme, géopolitique).**

### Marc Petit

Professeur à CentraleSupélec

### Des infrastructures critiques interdépendantes

L'époque actuelle est confrontée à de nombreux défis que ce soit dans le sec-

teur énergétique, dans le secteur des transports, ou dans le secteur des communications/données, et dans bien d'autres encore. Pour le secteur énergétique, c'est le défi de la décarbonation du mix de production et une digitalisation croissante accompagnée d'une utilisation plus massive d'équipements communicants. Pour le secteur des transports, c'est une électrification forte pour décarboner,

ce qui transforme le lien à l'énergie, mais c'est aussi une évolution des modes de transport avec des approches multimodales, de nouveaux services de mobilités, et des moyens de transport qui s'appuient de plus en plus sur des échanges d'informations et moyens de communication. Pour le secteur des communications/données, il s'agit d'apporter des solutions dans un monde de plus en plus interconnecté

et consommateur d'informations et de données.

Ces trois secteurs (énergie, transport, communication) sont des systèmes complexes dont les utilisateurs attendent une parfaite fiabilité et disponibilité. Ces secteurs sont également de plus en plus interdépendants. Par exemple,

- les transports sont dépendants de la disponibilité énergétique (le réseau électrique pour la mobilité électrique, ou l'approvisionnement en carburants fossiles), mais aussi des systèmes de communication (pour les GPS, la circulation des trains, l'hébergement de données) ;
- les systèmes de communication/données sont consommateurs d'énergie (l'explosion de la consommation des centres de données), et requièrent une haute qualité de fourniture et de disponibilité de l'électricité ;
- Les infrastructures électriques (les réseaux) sont opérées depuis des centres de conduite (nationaux ou régionaux) à partir de données mesurées en des points clés, les télémesures permettent d'avoir une vue en temps réel (ou quasi-temps réel) de l'état du réseau.

Depuis janvier 2023, la Commission européenne a mis en œuvre la directive sur la résilience des entités critiques qui vise à les protéger des menaces (risques naturels, attaques terroristes, sabotage, urgences sanitaires, ...). Onze secteurs sont concernés, parmi lesquels l'énergie, les transports, et les infrastructures digitales. Pour ces secteurs, une défaillance des infrastructures aurait un fort impact sur le fonctionnement des Etats. Face à cela la commission a défini trois priorités d'actions : la préparation face aux événements, la réponse lors d'un événement, et la coopération internationale.

Ces dernières années le terme RESILIENCE est devenu un terme clé avec des événements qui ont pu affecter des infrastructures : des événements météorologiques

de grande ampleur liés au changement climatique, ou des attaques (cybersécurité, infrastructure de production/transport d'énergie, câbles de communications) liées à la résurgence de conflits entre Etats avec en premier lieu la guerre menée par la Russie contre l'Ukraine.

Avant de présenter le contenu du dossier, cette introduction est l'occasion d'expliquer le concept de résilience et les cadres d'analyse mis en place pour traiter ce sujet. Malgré la diversité des secteurs concernés, il apparaît que certaines méthodologies et analyses utilisées présentent de fortes similitudes.

## Définition de la résilience

Même s'il existe de nombreuses définitions du concept de résilience, elles restent toutes assez proches. Par exemple, dans l'énergie, l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) stipule que c'est « la capacité du système énergétique ou ses composants à faire face à un événement ou une évolution dangereuse, en réagissant de manière à maintenir ses fonctions, identités et structures essentielles, tout en conservant une capacité d'adaptation, d'apprentissage et de transformation ».

De manière similaire, l'OCDE, dans un rapport sur la résilience des systèmes

de transport, propose la formulation suivante : « la résilience est la capacité du secteur à faire face, s'adapter, et se rétablir à la suite d'incidents de grande ampleur qui peuvent être de nature géopolitique, climatique, ou de sécurité énergétique ». Ce rapport aborde un certain nombre de concepts clés pour l'étude de la résilience, qui sont transposables à d'autres secteurs : la réduction des incertitudes, l'évaluation des vulnérabilités, et les mesures à mettre en œuvre pour atténuer les impacts et adapter le système.

Les événements considérés pour l'analyse de la résilience sont classés dans la catégorie des événements à fort impact et faible probabilité (*High Impact, Low Probability*).

La résilience d'un système est souvent représentée par une courbe qui illustre l'évolution des fonctions d'un système suite à un incident de grande ampleur. Cette figure représente plusieurs indicateurs clés : la durée pour recouvrer ses capacités initiales (ou minimales) en fonction des mesures ex-post mises en œuvre, et la capacité à assurer des fonctions minimales (robustesse) au plus fort de l'incident. Ce dernier point dépend des actions mises en œuvre ex-ante. Il faut aussi définir la notion de performance minimale juste après l'incident, puis dans la phase de restauration qui peut se faire par paliers.

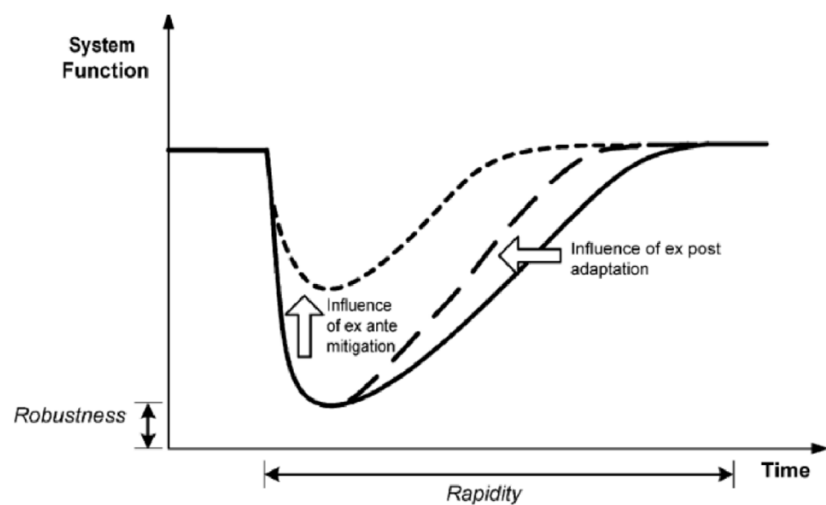


Figure 1 : Représentation symbolique de l'évolution des performances d'un système suite à une perturbation de grande ampleur.

●●● Pour ceux qui sont familiers des systèmes électriques, cette figure fait penser à l'évolution de la fréquence du réseau électrique suite à une perte d'unité de production. La fréquence va initialement baisser avec une pente qui dépend de l'inertie du système (gérée par des actions ex-ante visant à avoir suffisamment d'unités de production avec des machines tournantes, ou en contrôlant spécifiquement les onduleurs des producteurs photovoltaïques), avec un minimum qui ne doit pas descendre sous un seuil afin de ne pas déclencher du délestage « brutal », puis un rétablissement de la fréquence via des actions de réglage ex-post (réglages primaire et secondaire).

Bien-sûr, selon les cas d'applications, l'échelle temporelle n'est pas la même.

## Mesures ex-ante et ex-post

Ainsi, pour améliorer la résilience deux catégories de mesures sont à mettre en place.

- **Les mesures d'atténuation des effets (ex-ante)**, Il s'agit d'identifier et évaluer les vulnérabilités et mettre en œuvre des actions préventives (ou prédictives) pour réduire la probabilité d'incident. Cela peut passer par le renforcement des infrastructures ou la création de redondances.

- **Les mesures d'adaptation (ex-post)**. Il s'agit de définir les mesures pour répondre aux impacts immédiats. Ces mesures peuvent être à considérer dans des phases de planification. Par exemple définir des plans de défense adaptés à toutes les situations, former les équipes opérationnelles (centres de dispatching de RTE, ou ACR – agences de conduite régionales – pour les réseaux de distribution) avec un développement d'outils d'aide à la décision pour prioriser les actions, en fait, bien savoir qui fait quoi, quand et comment. Il faut aussi définir les actions de restauration du système, parfois par le biais de réparations ou reconstructions des infrastructures. A partir du retour d'expérience, c'est alors l'occasion de reconstruire en mieux pour réduire la probabilité de défaillance ultérieure.

**“ Du point de vue des autorités régulatrices, il y a des compromis à trouver entre les mesures ex-ante et ex-post, pour mener une optimisation technico-économique sous incertitude (événement à faible probabilité) qui doit prendre en compte le coût de la défaillance du système (événement à fort impact). ”**

Le retour d'expérience permet également de mettre en place des actions ex-ante sur d'autres sites. Par exemple, à la suite de la catastrophe de Fukushima, EDF a décidé d'installer des groupes diesel d'ultime secours (les fameux DUS) sur chacun de ses groupes nucléaires pour garantir le fonctionnement des pompes des circuits de refroidissement en cas d'incidents majeurs.

Du point de vue des autorités régulatrices, il y a des compromis à trouver entre les mesures ex-ante et ex-post, pour mener une optimisation technico-économique sous incertitude (événement à faible probabilité) qui doit prendre en compte le coût de la défaillance du système (événement à fort impact).

## Classification des défaillances

Il est utile de s'arrêter sur les causes des défaillances. Usuellement, ces causes sont classées dans une approche matricielle (Cf. tableau 1) : internes (technique, opérationnelle, humaine) ou externes (météo, pandémie), accidentelles ou intentionnelles. Les exemples mentionnés sont issus du rapport OCDE sur les transports, mais cela s'applique clairement au secteur

électrique (modulo éventuellement les grèves), ou au secteur digital. Les causes externes sont complètement transposables d'un système à l'autre. La détérioration des matériaux sous l'effet des très fortes chaleurs (les câbles électriques, la structure des routes), l'impact des chutes d'arbres lors de fortes tempêtes (arrachement de lignes électriques, blocage de routes), l'arrachage de câbles électriques ou de communication sous-marines (fortuit par des ancrages de bateaux, ou dégradation volontaire).

A contrario, les causes internes peuvent être plus spécifiques : un mauvais réglage d'une protection électrique qui induirait une mise hors tension intempestive d'une ligne suivi de déclenchements en cascade d'autres lignes, une mauvaise appréciation de distance sur un véhicule autonome qui conduirait à une collision ou une défaillance d'un système de signalisation (accident ferroviaire grave).

Au sein d'un système, une défaillance grave est souvent la résultante d'un enchaînement d'événements sous forme d'une cascade. Dans les systèmes électriques, les cascades de surcharges sont bien connues pour souvent être à l'origine d'un black-out :

Causes	Accidentelles	Intentionnelles
Internes	Technique, opérationnelle, humaines	Grèves
Externes	Météo, pandémie	Géopolitique, cyber-attaque, sabotage

Tableau 1 : Origine des défaillances selon leurs causes.

au sein d'un réseau maillé, la mise hors tension d'une ligne 400 kV surchargée induit un report de charge sur les lignes voisines qui passent en surcharge et déclenchent à leur tour, générant ainsi un effet domino. Il apparaît alors des poches de réseau qui ne sont pas en mesure d'assurer leur équilibre entre production et consommation ce qui conduit au black-out (cependant, ce n'est pas ce qu'il s'est passé pour la péninsule ibérique en 2025).

Enfin, du fait de l'interdépendance entre les systèmes, une défaillance sur l'un peut fortement impacter l'autre et conduire à un blocage total d'une zone. Le dernier exemple, c'est le black-out espagnol où l'effondrement du système électrique a bloqué les transports en commun mais aussi les communications (plus d'énergie pour l'alimentation des antennes). Si cette interdépendance a permis d'améliorer l'efficacité de fonctionnement de chacun de ces systèmes, elle contribue également à une augmentation des points de fragilité (vulnérabilités) et donc des risques de défaillance globalisée par effet cascade.

## Évaluer la résilience par des indicateurs quantitatifs

Des indicateurs sont indispensables pour évaluer la résilience d'un système, et mener des optimisations technico-économiques. Par exemple certains visent à estimer la capacité d'un système à absorber le « choc » de la défaillance dans les premiers instants, ou limiter son impact avant la phase de restauration (voir la figure du premier article pour l'illustration des différentes phases). Ces indicateurs peuvent être qualitatifs ou quantitatifs.

Les indicateurs peuvent mesurer :

- *La capacité de résilience du système physique*, avec des métriques basées sur la performance. Il s'agit d'évaluer les performances du système lors de la perturbation, comment ces performances se dégradent (à quelle vitesse, et avec quelle amplitude).

- *La capacité de restauration des fonctions du système*. L'indicateur principal est la durée de la phase de restauration. Celle-ci peut être scindée en deux, une première partie à court terme avec la récupération d'un minimum de fonctions (à la suite d'actions opérationnelles), puis une seconde partie sur un temps plus long qui donne lieu à des interventions sur l'infrastructure.

- *La capacité de l'organisation à contribuer à la résilience*. Ce sont principalement des indicateurs tournés vers les sociétés exploitantes (méthode de gestion des urgences, plan d'urgence, gestion des maintenances, gestion des équipes d'intervention...) évalués par des approches davantage qualitatives.

Dans un but illustratif, voici quelques indicateurs qui ont été proposés pour évaluer la résilience. Ils peuvent contribuer à limiter la progression de la perturbation. On cite ici quelques indicateurs qui peuvent être utilisés dans différents systèmes :

- Le nombre de nœuds d'interconnexion et/ou les points d'entrée du système (interconnexions électriques ou gazières, terminaux méthaniers, les hubs des réseaux de communication intercontinentaux). En Europe, les interconnexions des réseaux électriques et gaziers visent à améliorer la sécurité de fonctionnement globale.

- Les capacités de transport des liaisons (électriques, gaz ou communication)

- Le nombre et le type d'unités de production (diversifier les technologies, et adapter leur taille donc leur nombre), même si, dans le cas du système électrique, des unités de production très décentralisées

n'ont pas le même rôle que des unités centralisées.

- La connectivité des nœuds. Plus un nœud est connecté à d'autres nœuds, plus c'est robuste. En électricité, c'est la notion de maillage. Dans le transport, c'est la capacité à desservir facilement un point et avoir des routes de secours.

- La capacité de reconfiguration du système, via des équipements de « re-routage » automatique.

Dans une phase post-perturbation, on peut citer :

- Le taux de disponibilité d'équipements de rechange qui impactera la durée pour recouvrer l'état et les performances initiales du système.

- La durée d'interruption de service.

Au-delà d'indicateurs, il faut aussi des mesures fiables pour évaluer au mieux l'état en temps réel du système, en particulier lorsque la résilience peut être remise en cause par des phénomènes aux dynamiques rapides (secondes, minutes). Couplées à des modèles du (des) système(s), ces mesures peuvent permettre de prévoir le comportement et d'agir en conséquence.

## Le contenu du dossier

Dans le contexte actuel de profonde transformation de nos sociétés, la résilience des infrastructures critiques est un sujet qui présente de nombreux défis scientifiques, technologiques, industriels, économiques et réglementaires. Ce dossier s'articule autour

**“ Dans le contexte actuel de profonde transformation de nos sociétés, la résilience des infrastructures critiques est un sujet qui présente de nombreux défis scientifiques, technologiques, industriels, économiques et réglementaires. ”**

## “ Malgré la diversité des secteurs d’activités, les méthodologies d’étude de la résilience des systèmes sont très transverses. ”

●●● de quatre articles qui ont une vocation complémentaire, en commençant par une vision de recherche académique pour poser un certain nombre d’éléments méthodologiques, puis en présentant les stratégies de deux opérateurs d’infrastructures, puis une réflexion sur l’apport de l’intelligence artificielle à ces enjeux stratégiques.

### Vers l’optimisation de la résilience des infrastructures complexes : un champ de recherche académique

Malgré la diversité des secteurs d’activités, les méthodologies d’étude de la résilience des systèmes sont très transverses. Les interdépendances croissantes rendent indispensables les approches croisées. C’est sur la base de ce constat que fonctionne la chaire « Risques et Résilience des Systèmes Complexes » qui regroupe aujourd’hui plusieurs opérateurs d’infrastructures critiques : Orange, SNCF, NaTran, Rte et EDF. L’article, signé par **Anne Barros**, aborde la question de la modélisation de ces interdépendances pour l’optimisation de la résilience, puis l’optimisation des stratégies de maintenance (prédictives) dans un contexte de mesures imparfaites, puis ouvre sur le besoin de renforcer les travaux sur les études de résilience face aux aléas climatiques extrêmes.

### Orange face aux nouveaux enjeux de la résilience des réseaux

A l’heure où les systèmes s’appuient de plus en plus sur des échanges de données pour optimiser leur fonctionnement, la sécurité des réseaux de communication est fondamentale. En tant qu’acteur majeur du secteur, Orange a mis en place une culture de résilience qui est décrite dans l’article signé par **François Brichet**, **Nicolas Bihannic** et **Bertrand Decocq**.

Cet article présente les nouveaux risques et nouvelles menaces auxquels il faut faire face, et les pistes d’actions à mettre en œuvre pour réussir. Dans un contexte d’infrastructures interdépendantes, le renforcement de la résilience doit aussi passer par une meilleure coopération entre acteurs d’infrastructures.

### Ruptures et résilience à RTE

En tant qu’acteur clé de la sûreté du système électrique en France, et plus gros gestionnaire de réseau de transport en Europe, RTE s’investit très fortement sur les questions de résilience, bien au-delà des aléas techniques. L’article, signé par **Erik Pharabod**, **Thomas Guillon**, **Pierre Lefèvre** et **Catherine Lelong**, explique comment le sujet de la résilience s’est transformé en culture d’entreprise totalement intégrée à la prospective pour assurer la continuité et la qualité de l’alimentation électrique nécessaire au développement économique de la France et de l’Europe.

### L’Intelligence artificielle et la résilience des systèmes complexes : mythe ou réalité ?

Face à des systèmes industriels dont la complexité rend les pannes plus diffi-

cilement prévisibles, l’intelligence artificielle permet de passer d’une réaction subie à une anticipation proactive. L’auteur, **Fabrice Dupuy** (SEE), explique comment l’IA pourrait permettre aux infrastructures critiques une meilleure capacité de rétablissement face aux chocs majeurs. Mais cette efficacité reste conditionnée à un réglage métier rigoureux et à une exploitation massive de données de haute qualité. ■

## Références

[1] OCDE, ITF (2024), Transport System Resilience: Summary and Conclusions, ITF Roundtable Reports, No. 194, OECD Publishing, Paris.

[2] L. Martišauskas, J. Augutis, R. Krikštolaitis, R. Urbonas, I. Šaruniene, V. Kopustinskis, A Framework to Assess the Resilience of Energy Systems Based on Quantitative Indicators. *Energies* 2022, 15, 4040. <https://doi.org/10.3390/en15114040>

[3] M. Panteli, Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies, *Proceedings of the IEEE* (Volume: 105, Issue: 7, July 2017)

[4] OCDE, Enhancing the resilience of communication networks, *OECD digital economy papers*, May 2025 No. 374

[5] Commission Européenne, Critical infrastructure resilience at EU-level, site internet.

## Les articles

<b>Résilience des infrastructures complexes : un champ de recherche académique</b>	p.47
<b>Orange face aux nouveaux enjeux de la résilience des réseaux</b>	p.55
<b>Ruptures et résilience à RTE</b>	p.62
<b>L’Intelligence artificielle et la résilience des systèmes complexes: mythe ou réalité</b>	p.70