



**HAL**  
open science

## Mieux Anticiper la phase de reconstruction postcrue : Proposition d'une approche intégrée pour la réduction de la vulnérabilité des réseaux techniques franciliens

Anas Dabaj, Frédéric Gache, Marc Vuillet, Gwenaël Jouannic, Youssef Diab

### ► To cite this version:

Anas Dabaj, Frédéric Gache, Marc Vuillet, Gwenaël Jouannic, Youssef Diab. Mieux Anticiper la phase de reconstruction postcrue : Proposition d'une approche intégrée pour la réduction de la vulnérabilité des réseaux techniques franciliens. Congrès Lambda Mu 22 " Les risques au cœur des transitions " (e-congrès) - 22e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2020, Le Havre (e-congrès), France. hal-03462940

**HAL Id: hal-03462940**

**<https://hal.science/hal-03462940>**

Submitted on 2 Dec 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Mieux Anticiper la phase de reconstruction post-crue : Proposition d'une approche intégrée pour la réduction de la vulnérabilité des réseaux techniques franciliens

## Anticipating the post-flood reconstruction phase: Proposal of an integrated approach for reducing Ile-de-France's critical infrastructures vulnerabilities

Anas Dabaj  
EPTB Seine Grands Lacs  
Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, Lab'Urba,  
Université Gustave Eiffel  
12 rue Villiot, Paris, France.  
anas.dabaj@seinegrandslacs.fr

Marc Vuillet  
Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, Lab'Urba,  
Université Gustave Eiffel  
80 Rue Rébeval, Paris, France  
marc.vuillet@eivp-paris.fr

Youssef Diab  
Université Gustave Eiffel  
5 Bd Descartes, Champs-sur-Marne, France  
youssef.diab@eivp-paris.fr

Frédéric Gache  
EPTB Seine Grands Lacs  
12 rue Villiot, Paris, France.  
frederic.gache@seinegrandslacs.fr

Gwenaél Jouannic  
CEREMA Ouest  
9 Rue René Viviani, Nantes, France.  
gwenael.jouannic@cerema.fr

**Abstract**—This paper presents an original approach for reducing the vulnerabilities of technical urban networks in the Ile-de-France region to flooding, based on two pillars: risk analysis and multi-criteria optimization for safety barrier allocation.

**Résumé**—Cette communication présente une approche originale pour la réduction des vulnérabilités des réseaux techniques urbains franciliens aux inondations s'articulant autour de deux axes : l'analyse des risques et l'optimisation multicritères de l'allocation des barrières de sécurité.

**Keywords**—réseaux techniques urbains, analyse de risque, optimisation multicritère, inondation.

### I. INTRODUCTION

#### A. Les réseaux techniques urbains franciliens face risque inondation

Une crue majeure de la Seine et de ses affluents serait susceptible de générer selon les différents scénarios de crue des dommages directs pour le territoire francilien allant jusqu'à 30 milliards d'euros selon les différents scénarios de crue [1]. Plus spécifiquement, les réseaux techniques urbains franciliens<sup>1</sup> sont particulièrement vulnérables aux inondations et pourraient subir des dommages

considérables. Ainsi, l'on estime que les impacts indirects d'une crue majeure, résultant des dysfonctionnements des réseaux techniques urbains (RTU) notamment, pourraient atteindre 50 Mds de perte de PIB sur 5 ans [1].

Les RTU sont particulièrement vulnérables aux inondations car leur bon fonctionnement repose sur celui de sous-systèmes et de composantes qui ne sont pas adaptés à la submersion par l'eau, et encore moins à une submersion longue comme ce qui pourrait être le cas en Ile de France. A titre d'exemple, le bon fonctionnement du réseau de distribution d'électricité est très dépendant du fonctionnement des postes sources et des postes de distribution HTA/BT<sup>2</sup> qui sont fortement sensibles à l'eau [2]. De même, la majorité du matériel ferroviaire comme les équipements de signalisation et d'aiguillages ou les stations de pompage sont très sensibles au contact avec l'eau, ce qui rend les réseaux de transports urbains RATP et SNCF vulnérables en cas d'inondation [3].

Dans ce sens, et afin de pallier ces vulnérabilités aussi bien que les dommages potentiels pouvant en découler, les gestionnaires de ces réseaux urbains déploient des dispositifs d'évitement et de protection afin que ces

<sup>2</sup> Poste électrique permettant de transformer la haute tension issue des postes sources en un courant basse tension pour alimenter les clients

<sup>1</sup> RTU : Réseaux techniques urbains franciliens

équipements sensibles restent à l'abri de l'eau. Ces mesures de protection conservatoires conditionnent la nature ainsi que l'ampleur de l'endommagement des réseaux. Il s'agit par ailleurs de dispositifs mis en place en phase de mitigation et/ou de réponse et qui ont un impact sur la stratégie de rétablissement, de relèvement voire de reconstruction de ces infrastructures.

L'objectif de notre recherche est donc d'élaborer une méthodologie générique et opérationnelle d'anticipation et de planification du choix et de la mise en œuvre des mesures de réduction des vulnérabilités, dont les préconisations pourraient être déployées avant (prévention et mitigation) ou après (réponse et relèvement) l'occurrence d'une crue en fonction des conjonctures, des ressources financières disponibles ainsi que des choix stratégiques adoptés par les gestionnaires de réseaux.

## B. Proposition d'une approche intégrée pour la gestion du risque inondation

Face à ces constats, et dans l'objectif d'une planification ex-ante des mesures de réduction des vulnérabilités des RTU face aux crues, nous proposons une méthodologie s'articulant autour de deux grands axes: la quantification des risques et l'aide à la décision pour l'optimisation multicritères des investissements nécessaires pour la réduction des risques quantifiés (Fig.1).

Dans un premier temps (Cf. Fig1: *Module d'analyse des risques*), et afin d'identifier les modes de défaillance de multiples composants de notre système, nous proposons de mettre en œuvre une analyse fonctionnelle suivie d'une analyse des modes de défaillances et de leurs effets spécifiques aux RTU étudiés faisant face à un phénomène

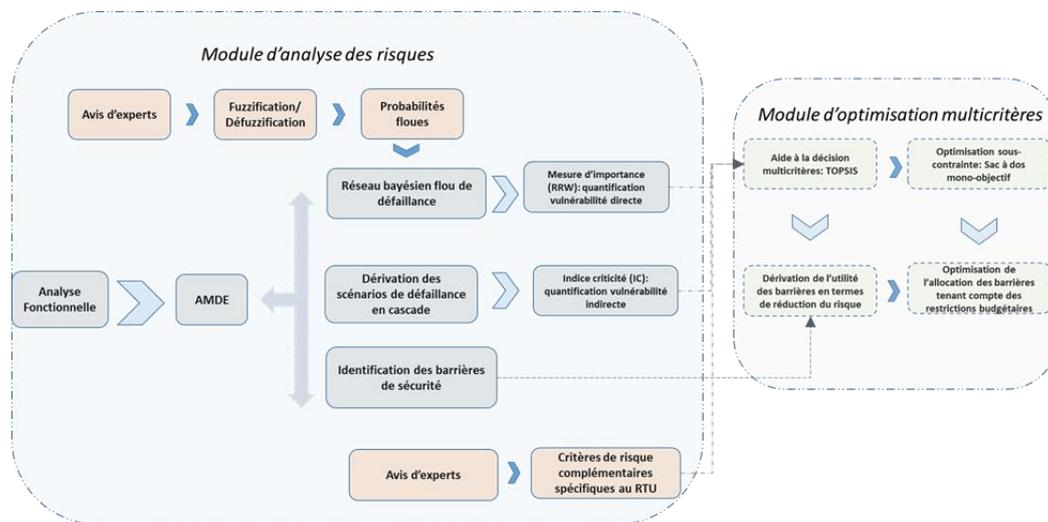


Fig.1. Méthodologie de planification de la réduction des risques pour les RTU en contexte de crue

de crue. Nous proposons ensuite un indicateur pour quantifier la contribution de la défaillance de chaque composant dans la défaillance de l'ensemble du système. Pour se faire, nous construisons un réseau bayésien flou de défaillance du RTU puis nous proposons de calculer les mesures d'importance pour chacun des sous-systèmes et composants étudiés [4], [5]. Le risque de défaillance en cascade est également pris en compte via l'indicateur de criticité tenant compte des interdépendances que l'on a introduit dans ce travail. En sus de ces éléments, nous intégrons dans notre approche d'autres critères qui peuvent être importants dans le choix du processus de fiabilisation et qui peuvent varier d'un réseau à un autre selon la nature du RTU et les préférences de son gestionnaire.

Nous procédons par la suite à l'identification des solutions d'adaptation qui vont dans le sens de la réduction des risques identifiés et quantifiés dans les étapes précédentes. A cet égard, nous présentons la notion de barrière de sécurité et les typologies de barrières de sécurité pouvant être déployées pour le cas des RTU considérés en contexte de crue.

Le deuxième volet de la méthodologie (Cf. Fig1: *Module d'optimisation multicritères*), concerne l'aide à la décision pour l'optimisation multicritères des investissements. En

effet, et partant des résultats de l'étude des risques conduites, nous formalisons notre problème d'aide à la décision dans l'optique de dériver l'utilité des barrières de sécurité identifiées en termes de leurs impacts sur la réduction des risques. Nous mettons en œuvre une méthode d'agrégation de synthèse, TOPSIS, qui permet de dériver une fonction d'utilité en agrégeant les différents critères retenus.

Finalement, et dans l'objectif de prendre en compte à la fois les différents critères de réduction des risques, de contraintes budgétaires auxquelles font face les gestionnaires de RTU et la nécessité d'optimiser l'allocation des ressources financières, nous combinons le résultat de l'analyse multicritères avec un modèle d'optimisation mathématique, en l'occurrence le « knapsack model ».

La suite de notre communication est organisée comme suivant : nous présentons dans la deuxième partie les étapes méthodologiques utilisées dans le cadre de notre recherche. Ensuite, nous illustrons l'applicabilité de notre méthodologie dans la troisième partie pour le cas d'un réseau ferré urbain francilien. Enfin, nous discutons des perspectives de transpositions à d'autres RTU et des pistes d'amélioration de notre démarche.

## II. LE MODULE D'ANALYSE DES RISQUES

### A. L'analyse fonctionnelle comme préalable à l'analyse des risques

La démarche proposée consiste à réaliser dans un premier temps une analyse structurelle puis fonctionnelle du réseau étudié afin de pouvoir identifier les sous-systèmes qui composent le réseau ainsi que les interactions possibles entre les différents composants de ces sous-systèmes. Cette première étape d'analyse fonctionnelle représente une étape importante pour le développement du modèle dysfonctionnel du réseau impacté par une inondation [6], [7]. A cet effet, nous procédons en deux phases : on recense de manière exhaustive les sous-systèmes et les composants du RTU et l'on identifie les éléments du milieu extérieur entrant en relation avec ceux-ci. Ensuite, on cartographie des dépendances fonctionnelles entre les sous-systèmes d'études sous forme d'une matrice d'adjacence selon le formalisme suivant: s'il existe une relation de dépendance entre les deux composants  $i$  et  $j$ , la cellule  $(i,j)$  prend la valeur 1, sinon 0 le cas échéant.

### B. L'analyse des modes de défaillances et de leurs effets: AMDE

De par son exhaustivité, le modèle fonctionnel établi nous permet d'identifier les différents composants des sous-systèmes ainsi que les interactions de contact et de flux qu'entretiennent ces derniers. En confrontant ces éléments aux impacts d'aléas hydrologiques, on peut alors identifier les causes ainsi que les conséquences directes et en cascade de la défaillance de chacun des sous-systèmes étudiés. Les résultats de cette analyse sont rassemblés dans une AMDE où sont listés les sous-systèmes du réseau étudié, les composants des sous-systèmes, la cause de défaillance de chacun des composants ainsi que l'effet de leurs défaillances respectives. Les résultats de l'AMDE sont par la suite exploités dans les parties suivantes pour le calcul des mesures d'importance ainsi que pour la construction des scénarii de défaillance en cascade.

### C. Quantification de la vulnérabilité directe des sous-systèmes et des composants

#### 1) Quantification des probabilités de défaillance par un formalisme flou

Afin de déterminer la fiabilité relative des composants, nous proposons aux experts d'évaluer qualitativement leurs probabilités de défaillance via des variables linguistiques que nous quantifions ensuite via des sous-ensembles flous [8]. Dans ce sens, notre démarche propose de suivre le cheminement ci-dessous :

- Consultation des experts du RTU étudié afin de recenser leurs jugements sur la probabilité de défaillance de chacun des composants et des sous-systèmes de leurs réseaux, par le biais de variables linguistiques. A cet effet, cinq termes linguistiques (variables linguistiques) ont été proposés aux experts du RTU (très faible, faible, moyenne, haute, très haute) pour exprimer leurs avis. Il est à noter que le choix de 5 variables linguistiques est justifié par les travaux de [9], [10] qui précisent que la

capacité de jugement d'un être humain est établi sur une échelle entre 5 et 9 valeurs distinctes.

- Conversion des variables linguistiques en des fonctions d'appartenance floues qui permettent de prendre en compte dans la modélisation les imprécisions possibles d'évaluation entre deux variables linguistiques adjacentes via des sous-ensembles flous (Cf. Fig.2). Nous optons pour la représentation des variables linguistiques par des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales selon le formalisme proposée par [11].
- Agrégation des fonctions d'appartenance issues des avis des experts afin de limiter les biais et d'aboutir à des quantifications fiables. A cet égard, nous faisons appel à la méthode d'agrégation par similarité proposée par [12], [13].
- Défuzzification des valeurs agrégées afin d'aboutir à une valeur qui représente au mieux la possibilité de défaillance du composant (*crisp value*). Nous utilisons dans ce sens la méthode du Max-Min proposée par [11]. Il est à noter que le choix de défuzzification après le processus de fuzzification est justifié par le fait que le gestionnaire de RTU devrait prendre une décision précise (*investir, non investir*) afin de fiabiliser les équipements vulnérables malgré l'imprécision des connaissances [14]. Le contexte opérationnel de la prise de décision nous a amené donc à défuzzifier les valeurs floues agrégées dans une approche similaire à celles de [15]–[17].

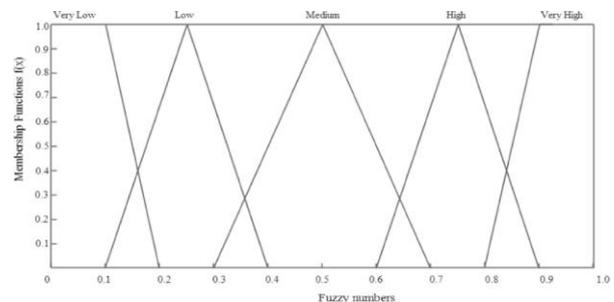


Fig. 2. Echelle de conversion des termes linguistiques en fonction d'appartenance [18]

#### 2) Elaboration du réseau bayésien flou de défaillance du RTU

Un réseau bayésien, est un modèle graphique qui illustre les relations causes-conséquences dans un système. Le réseau est constitué de nœuds et d'arcs orientés. Un nœud représente un état ou une condition tandis qu'un arc indique une influence directe [19]. Cela étant, et selon la nature et l'objectif de l'analyse des risques, les réseaux bayésiens peuvent parfaitement remplacer les arbres de défaillance, les arbres d'événements, ainsi que les nœuds papillon en fonction de la nature et de l'objectif de l'analyse de risque. Dans notre démarche, nous avons commencé par la construction de l'arbre de défaillance du RTU étudié, puis nous l'avons converti en réseau bayésien selon le formalisme proposé par [20]. Ce choix méthodologique

permet plus d'aisance et de flexibilité dans l'expression des relations causes-conséquences de défaillance et offre également d'autres possibilités comme la réalisation d'analyses prévisionnelles ou rétrospectives[21].

Dans la construction de notre réseau bayésien, nous avons suivi le cheminement suivant :

- Renseignement direct de la probabilité de défaillance floue obtenue par dire d'expert pour les nœuds n'ayant pas de parents.
- Renseignement de la probabilité de défaillance des nœuds ayant des parents dépendamment de la nature de la causalité de défaillance :

→ Si un composant  $X_i$ (nœud  $X_i$ ) est défaillant si au moins l'un de ses parents  $P_i$  est défaillant, sa probabilité de défaillance est renseignée comme :

$$p(X_i) = 1 - \prod_i (1 - p(P_i)) \quad (1)$$

→ Si le composant  $X_i$  est cette fois-ci défaillant si et seulement si tous ses parents  $P_i$  sont défaillants, sa probabilité de défaillance est renseignée comme :

$$p(X_i) = \prod_i p(P_i) \quad (2)$$

→ En sus de ces deux relations logiques classiques (ET /Ou), nous avons renseigné la probabilité de défaillance de certains sous-systèmes et composants comme étant la moyenne de la probabilité de défaillance de leurs nœuds parents quand les deux relations logiques binaires Et/Ou ne semblent pas adaptées :

$$p(X_i) = \frac{1}{n} \sum P(P_i) \quad (3)$$

### 3) Calcul des mesures d'importance

Les mesures d'importance permettent de quantifier l'importance relative d'un composant en termes de sa contribution dans l'occurrence de la défaillance globale d'un système (Modarres, 2006 Rausand, 2014). Différentes mesures d'importance sont proposées dans la littérature de gestion des risques (Cf. Tableau 1), chacune avec des utilisations particulières dépendamment de la nature de l'information relative aux risques qu'elles permettent de quantifier [5]. Dans notre recherche, nous utilisons les deux mesures d'importance « Fussel-Vesely» (**FV**) et «Birnbaum importance» (**BI**) qui sont particulièrement adaptées à l'identification des composants et des sous-systèmes dont la fiabilisation sera la plus profitable pour la réduction du risque global de défaillance de l'ensemble du réseau [5]. Il faut noter néanmoins, que l'une des limites des mesures d'importance, est le fait qu'elles ne prennent pas en considération de manière explicite l'effet de la défaillance d'un composant sur le fonctionnement des autres composants qui lui sont dépendants[22], [23]

D. Quantification de la vulnérabilité indirecte : quantification des défaillances en cascade résultantes des intra-dépendances

#### 1) Construction des scénarios de défaillance en cascade

Pour pallier les limites des mesures d'importance à prendre en considération explicitement l'effet indirect (en cascade) de la défaillance d'un composant sur les autres, nous proposons dans la suite de la démarche d'analyse des risques d'identifier le profil comportemental de chaque composant vis-à-vis des défaillances en cascade. Il s'agit donc d'évaluer qualitativement et quantitativement la contribution de chaque sous-système dans les scénarii de défaillance en cascade via un indice de criticité qui synthétise et qui agrège le comportement de chacun des sous-systèmes du réseau étudié vis-à-vis de ce risque. Pour ce faire, un algorithme a été développé pour la construction des différents scénarios de défaillance en cascade à partir de l'AMDE selon le formalisme suivant (cf.fig.3) :

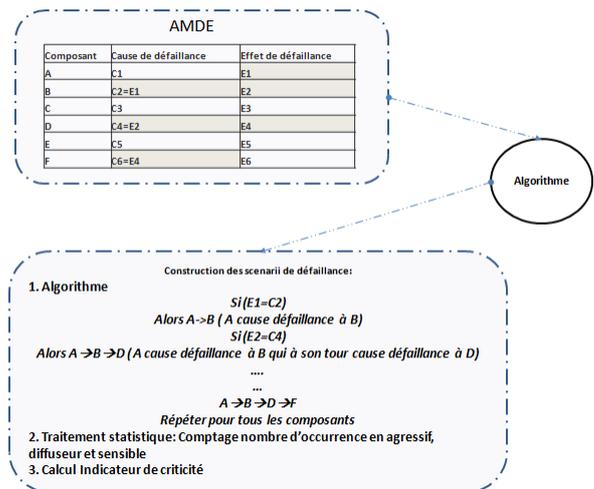


Fig. 3. Principe de construction des scénarios de défaillance en cascade

#### 2) Proposition d'un indicateur de criticité vis-à-vis des défaillances en cascade

A partir des scénarios de défaillance générés, les composants du système étudié sont identifiés selon une ou plusieurs catégories de profils comportementaux [6], [7] :

- **Profil agressif**: composant ou sous-système qui a tendance à être initiateur des défaillances en cascade.
- **Profil diffuseur**: composant ou sous-système qui contribue à la propagation des défaillances en cascade.
- **Profil sensible**: composant ou sous-système qui subit les défaillances en cascade en fin de chaîne.

Tableau 1: Mesures d'Importances, adapté de [5]

Mesures d'importance	Abréviations	Principes de calcul
Risk Reduction	RR	$P(base) - P(x_i = 0)$
Fussel-Vesely	FV	$\frac{P(base) - P(0)}{P(base)}$
Criticality Importance	CR	$\frac{P(x_i = 1) - P(x_i = 0)}{P(base)}$
Risk Achievement worth	RAW	$\frac{P(x_i = 1)}{P(base)}$
Birnbaum importance	BI	$P(x_i = 1) - P(x_i = 0)$

Par ailleurs, et en partant de l'hypothèse qu'un profil agressif est plus critique qu'un profil diffuseur qui lui-même est plus critique qu'un profil sensible, on pondère chacune de ses catégories en utilisant la formule du « rank sum weight » proposée par [24]. L'indice de criticité vis-à-vis des défaillances en cascade pour chaque profil comportemental est finalement donné comme suit :

$$Ic_{agressif} = 0.5 * Nombre_{occurrence_{agressif}} \quad (4)$$

$$Ic_{diffuseur} = 0.33 * Nombre_{occurrence_{diffuseur}} \quad (5)$$

$$Ic_{sensible} = 0.17 * Nombre_{occurrence} \quad (6)$$

L'indice de criticité finale vis-à-vis des défaillances en cascade est donc défini comme :

$$Ic = Ic_{agressif} + Ic_{diffuseur} + Ic_{sensible} \quad (7)$$

#### E. Intégration de critères opérationnels complémentaires

Outre la quantification des risques, d'autres critères apparaissent pertinents pour prendre en considération les différents aspects de la planification de la réduction des risques. A titre d'exemple, pour les gestionnaires d'un système ferroviaire urbain (SNCF/RATP), les critères suivants ont été retenus :

- **Importance fonctionnelle du composant à fiabiliser** : ce critère permet de quantifier l'importance d'un composant vis-à-vis de la continuité d'exploitation ferroviaire.
- **Coût d'endommagement** : ce critère permet de quantifier la perte financière qu'aura à subir le gestionnaire du RTU en cas de l'endommagement d'un composant à cause d'une crue majeure.
- **Temps pour la remise en service/reconstruction** : ce critère permet d'estimer le temps nécessaire pour la remise en service ou la reconstruction à l'identique d'un composant endommagé.

### III. METHODOLOGIE D'OPTIMISATION MULTICRITERES DE L'ALLOCATION DES MESURES DE REDUCTION DES RISQUES

#### A. Formalisation du problème d'aide à la décision multicritères :

La suite de notre démarche consiste à proposer des solutions de fiabilisation qui vont dans le sens de la réduction des risques quantifiés. Il s'agit en effet d'identifier les « barrières de sécurité » [19], [25] pouvant être déployées pour arriver à cette fin. Une fois identifiées, On se positionne comme étant un gestionnaire de RTU (décideur) dont l'objectif est d'optimiser l'allocation des ressources financières disponibles pour la réduction des risques de défaillance en cas de crue. La problématique d'aide à la décision que nous traitons donc, consiste en l'identification des meilleures barrières de sécurité pour la réduction des risques quantifiés. Autrement dit, l'objectif est d'établir un classement par ordre de priorité parmi ces barrières selon les critères qu'on a préalablement définis. Il s'agit donc d'un problème de rangement dans la mesure où notre objectif est de classer (du plus utile au moins utile) ces différentes barrières (Cf. tableau 2).

Dans ce sens, nous nous intéresserons à une méthode d'agrégation de synthèse [26] qui permet de dériver une fonction d'utilité en agrégeant les différents critères retenus

selon les préférences des décideurs, à savoir la méthode TOPSIS [27]. Le principe de cette méthode consiste à identifier une solution qui se rapproche le plus possible de la solution idéale pour laquelle tous les critères retenus sont bons et qui s'éloigne le plus de la pire solution pour laquelle lesdits critères sont les moins bons. Le lecteur intéressé pourra trouver plus de détails sur la méthode TOPSIS dans [27], [28]. En sus, l'axiome d'indépendance des critères est validé via le calcul du coefficient de corrélation statistique [29] [30]. Les poids de critères quand à eux sont dérivés par la méthode de l'entropie [30].

Il est à noter qu'au regard de la nature des critères retenus, la fonction d'utilité dérivée par la méthode TOPSIS est une agrégation du niveau du risque individuel qui va être diminué via l'implémentation de la barrière de sécurité identifiée. Dans la suite de cet article, nous noterons  $R_i$  cette fonction d'utilité et notons  $R$  le risque globale diminué tel que

$$R = \sum R_i \quad (8)$$

Tableau 2: Formalisation du problème d'aide à la décision

Décideur	Objectif	Critères
Gestionnaire de RTU	Classement des barrières de sécurité identifiées des plus utiles au moins utiles en termes de réduction des risques selon différents critères	C1: « FV » du composant à fiabiliser par la barrière de sécurité
		C2: « BI » du composant à fiabiliser par la barrière de sécurité
		C3: « IC » du composant à fiabiliser par la barrière de sécurité
		C4: Importance fonctionnelle du composant à fiabiliser par la barrière de sécurité
		C5: Coût d'endommagement du composant à fiabiliser par la barrière de sécurité
		C6: Temps de remise en service du composant à fiabiliser par la barrière de sécurité

#### B. Conversion du problème d'aide à la décision multicritères en un problème d'optimisation mathématique sous-contrainte : Problème du sac à dos

Si la fonction d'utilité  $R_i$  dérivée par la méthode TOPSIS dans la partie précédente permet de définir un classement des variantes possibles de fiabilisation, elle ne permet pas néanmoins de fournir une visibilité sur la meilleure façon avec laquelle on peut optimiser l'allocation de ces dernières. Ainsi, et dans l'objectif de prendre en compte l'utilité  $R_i$  de chaque barrière de sécurité, de maximiser la réduction des risques, et de respecter les contraintes budgétaires que nous combinons le résultat de l'analyse multicritères avec un modèle d'optimisation mathématique. Nous formulons donc notre problème comme un sac à dos (knapsack) mono-objectif pour maximiser la réduction des risques sous la contrainte d'un budget limite disponible.

$$Maximiser \{R\} = Maximiser \left\{ \sum X_i * R_i \right\} \quad (9)$$

$$\sum X_i * C_i \leq C \quad (10)$$

$$X_i \in \{0,1\}, i = 1,2, \dots, n \quad (11)$$

$X_i$ : la barrière de sécurité candidate,

$R_i$ : le risque diminué par la mise en place de  $X_i$

$C_i$ : le coût nécessaire pour l'implémentation de  $X_i$

$C$  le budget disponible

IV. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE POUR UN TRONÇON FERROVIAIRE

A. Description du système d'étude

Afin de mieux illustrer l'applicabilité de notre approche méthodologique, nous nous intéressons à sa mise en œuvre pratique pour le cas d'un système ferroviaire urbain du type RATP/SNCF faisant face au risque inondation. Plus précisément, notre système d'étude est constitué des sous-systèmes et équipements ferroviaires se trouvant dans une gare ainsi que dans les deux demi inter-stations avoisinantes. Ce choix de système d'étude permet de transposer aisément la démarche à l'ensemble d'une ligne ferroviaire, voire à l'ensemble d'un réseau ferroviaire urbain.

B. Analyse fonctionnelle et AMDE

En nous basant sur la connaissance métier d'experts ferroviaires, 9 sous-systèmes ferroviaires ont été retenus pour l'application de la méthodologie, à savoir la structure et les équipements de la gare, la structure et les équipements du tunnel, les équipements d'aérage et de désenfumage, les équipements de l'alimentation électrique basse tension, les équipements de la plateforme voie, les stations de pompage, les équipements de l'alimentation électrique de traction, les

équipements de régulation et de supervision. Par souci de clarté, nous ne détaillons pas ici le développement de l'analyse fonctionnelle et de l'AMDE et nous nous contentons d'explicitier notre démarche pour le sous-système Signalisation (Cf. Tableau 3). La démarche a été appliquée de manière similaire aux autres sous-systèmes.

C. Réseau bayésien flou et mesures d'importance

Le réseau bayésien de défaillance du tronçon ferroviaire a été élaboré par la suite selon la méthodologie décrite au paragraphe (C.2). Les probabilités floues de défaillance quant à elles, ont été obtenues en mobilisant 4 experts ferroviaires et en suivant la démarche proposée dans le paragraphe (C.1). Un extrait du réseau bayésien détaillant la défaillance du sous-système Signalisation est présenté ici (Fig.4).

Après construction du réseau bayésien flou de défaillance, le calcul des deux mesures d'importance « FV » et « BI » (paragraphe 2.A) a pu être effectué pour chaque composant du réseau. En sus, le profil comportemental et l'indice de criticité vis à des défaillances en cascade ont été quantifiés en suivant la démarche proposée aux paragraphes D.1 et D.2. Les critères complémentaires ont été également intégrés (Tableau4).

Tableau 3: AMDE du sous-système « Signalisation »

Sous-système	Composants	Fonctions	Causes de défaillance de la fonction	Effets de la défaillance
Signalisation	Centre de Signalisation (Génie Civil)	-Abriter et protéger l'ensemble des équipements électriques des centres de	Ennoiement du Tunnel	Endommagement du génie civil du centre de signalisation
			Ennoiement de la gare	Endommagement du génie civil du centre de signalisation
			Ennoiement du Tunnel	Ennoiement du centre de signalisation
			Ennoiement de la gare	Ennoiement du centre de signalisation
	Centre de Signalisation	Assurer la commande de la signalisation et de l'aiguillage pour le matériel roulant	Ennoiement du Centre de Signalisation	Endommagement des Centres de Signalisation I
			Défaillance Poste HT/BT (alimentation électrique)	Défaillance du Centre de Signalisation
			Défaillance Câbles de transmission et de remontée d'information	Défaillance du Centre de Signalisation
			Défaillance Câbles électriques gainés	Défaillance du Centre de Signalisation
	Câbles de transmission et de remontée	Assurer la transmission des positions des trains des	Défaillance Poste de commande à distance	Défaillance du Centre de Signalisation
			Ennoiement du Tunnel	Défaillance Câbles de Transmission et de remontée d'information
			Ennoiement de la gare	Défaillance Câbles de Transmission et de remontée d'information
			Ennoiement du Tunnel	Défaillance Câbles de Transmission et de remontée d'information
	Signalisation en ligne	Afficher les consignes de circulation du matériel roulant	Ennoiement de la gare	Endommagement de la Signalisation en ligne
			Défaillance Poste HT/BT (alimentation électrique)	Endommagement de la Signalisation en ligne
			Défaillance Câbles de transmission et de remontée d'information	Défaillance de la signalisation en ligne
			Défaillance Poste de commande à distance	Défaillance de la signalisation en ligne
			Défaillance du Centre de Signalisation	Défaillance de la signalisation en ligne
			Défaillance Câbles électriques gainés	Défaillance de la signalisation en ligne

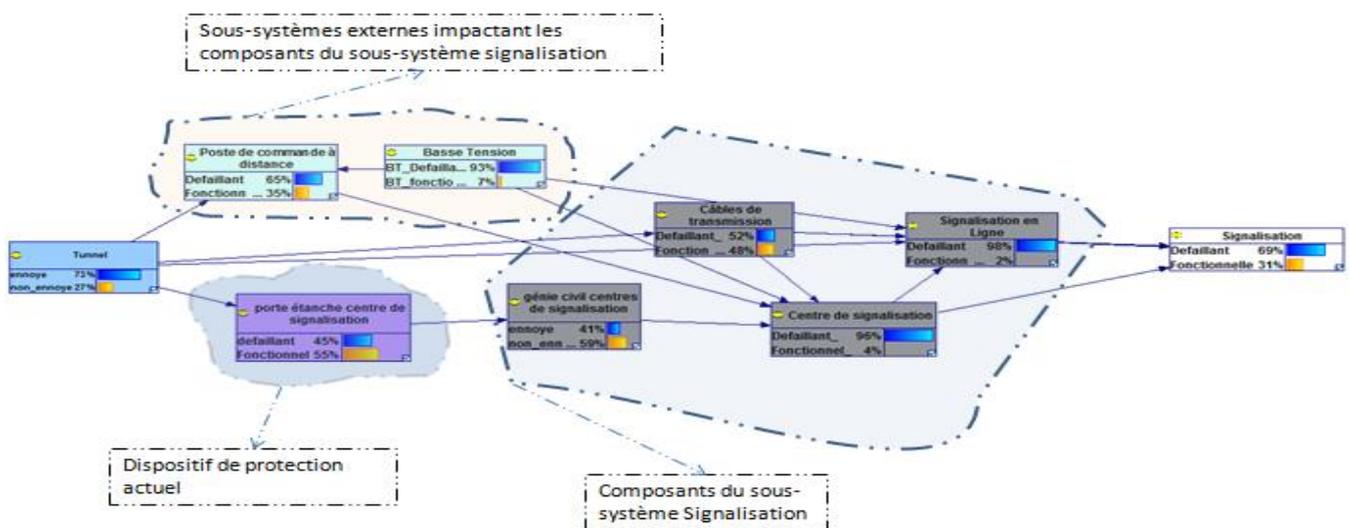


Fig. 4. Troncature du réseau bayésien flou de défaillance du sous-système « Signalisation »

#### D. Caractérisation multicritères des barrières de sécurité et estimation des coûts

Les solutions possibles de fiabilisation ont été recensées pour chaque composant du système avec une estimation du coût nécessaire pour leurs mises en place. Par ailleurs, et après calcul de la matrice de corrélation statistique entre les critères initialement retenus (*a priori indépendants*), il s'avère qu'il y ait une forte corrélation entre les valeurs des critères « FV-BI » et « coût-temps » respectivement (Tableau 4). Par conséquent, et afin d'assurer l'indépendance de ces différents critères, nous retiendrons finalement les 4 suivants : **IC, FV, Coût, Importance fonctionnelle**.

L'agrégation des différents critères de risques pour chaque composant a été effectuée par la suite via la méthode TOPSIS en pondérant les 4 critères finalement retenus par la méthode de pondération objective de l'entropie. Le risque agrégé est ensuite affecté à chacune des barrières de sécurité en partant de l'hypothèse que l'implémentation d'une barrière ne va pas laisser de risque résiduel.

Tableau 4: Matrice de corrélation statistique des critères

Critères	Indice finale de criticité	FV	BI	Coût	importance fonctionnelle	temps
Indice finale de criticité	1,00					
FV	0,25	1,00				
BI	0,33	0,97	1,00			
Coût	-0,05	0,28	0,24	1,00		
importance fonctionnelle	0,23	0,26	0,26	0,17	1,00	
temps	-0,05	0,30	0,25	0,98	0,15	1,00

#### E. Optimisation de l'allocation des barrières de sécurité

Afin d'optimiser l'allocation des barrières de sécurité tout en prenant en compte l'utilité de chaque barrière dans la réduction du risque, le coût nécessaire pour son implémentation ainsi que les ressources financières disponibles pour le processus de fiabilisation, nous supposons ici que le gestionnaire du réseau urbain ferroviaire dispose d'une enveloppe budgétaire de 4 millions d'euros.

Tableau.5. Identification et caractérisation des solutions de fiabilisation

composants	solutions de fiabilisation	coût	Risque agrégé évité
Centre de Signalisation (Génie Civil)	Etancheification intégrale du centre de signalisation	250000	0,00598347
	Mise en place d'un système de drainage des eaux résiduelles de suintement	200000	
Centre de Signalisation	Délocalisation du centre de signalisation	7000000	0,73723816
Câbles électriques gainé	Mise en place de nouveaux câbles électriques étanches au dessus des PHEC	1750000	0,05662829
	Etancheification de toutes les pénétrations des câbles dans le génie civil des	6250	0,05662829
Câbles de transmission et de remontée d'information	Mise en place de nouveaux câbles de signalisation étanches au dessus des PHEC	1750000	0,01286362
	Réhausse et et isolement des boites de redistribution	17500	0,01286362
Signalisation en ligne	Démontage des équipements de signalisation en ligne	2240	0,00230127

Après calcul, le résultat de l'optimisation propose de retenir 28 solutions de fiabilisation parmi les 50 solutions identifiées avec un coût global de 3.835.120 euros.

Les solutions de fiabilisation retenues pour le sous-système « Signalisation » sont surlignées en bleu dans le tableau 5.

#### V. IV : CONCLUSION :

Nous proposons dans cette communication une approche méthodologique opérationnelle combinant méthodes d'analyse de risque et d'optimisation multicritères dans l'objectif d'une allocation optimale des barrières de sécurité, pour les infrastructures critiques faisant face au risque inondation. Cette démarche a pour objectif d'aider les gestionnaires de RTU dans le processus de planification et d'anticipation de la réduction de leurs vulnérabilités.

Nous avons présenté dans un premier temps les différentes méthodes théoriques utilisées pour la construction de notre approche. Ensuite, les perspectives d'implémentation de notre démarche ont été examinées pour le cas d'un système ferroviaire urbain, avec un focus sur les composants du sous-système « Signalisation ». Les résultats obtenus sont cohérents et sont en concordance avec les attentes opérationnelles des gestionnaires de RTU ferroviaires urbains franciliens. Notre démarche reste néanmoins applicable pour l'ensemble des autres sous-systèmes et même d'autres RTU, comme celui de distribution d'électricité basse tension (Enedis).

Par ailleurs, force est de constater que notre approche suppose un risque résiduel nul pour les composants fiabilisés, après allocation d'une barrière de sécurité. Cette hypothèse a le mérite d'être remise en question en quantifiant le niveau de fiabilisation apporté par la barrière choisie, en suivant le même processus de quantification des probabilités floues proposés. De la sorte, le niveau de risque résiduel sera mieux quantifié et permettra de juger l'utilité de faire un transfert de risque résiduel via le recours aux dispositifs assurantiels. Ces questions seront mieux appréhendées dans la suite de nos recherches.

Références :

- [1] OCDE, « Etude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation : la Seine en Ile-de-France », OCDE, 2014.
- [2] M. Toubin, R. Laganier, Y. Diab, et D. Serre, « Improving the conditions for urban resilience through collaborative learning of Parisian urban services », *J. Urban Plan. Dev.*, vol. 141, n° 4, p. 05014021, 2014.
- [3] J. Brochet, « Plan de Protection contre le risque Inondation RATP », colloque CNFSH, 2019, Consulté le: févr. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hydrologie.org/CNFSH/CNFSH2009AG/Brochet.pdf>.
- [4] A. Noroozian, R. B. Kazemzadeh, S. T. A. Niaki, et E. Zio, « System Risk Importance Analysis Using Bayesian Networks », *Int. J. Reliab. Qual. Saf. Eng.*, vol. 25, n° 01, p. 1850004, févr. 2018, doi: 10.1142/S0218539318500043.
- [5] M. van der Borst et H. Schoonakker, « An overview of PSA importance measures », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 72, n° 3, p. 241-245, juin 2001, doi: 10.1016/S0951-8320(01)00007-2.
- [6] S. Lhomme, « Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine », p. 376, 2012.
- [7] M. Gonzva, « Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain: approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion », p. 461, 2017.
- [8] L. A. Zadeh, « The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I », *Inf. Sci.*, vol. 8, n° 3, p. 199-249, janv. 1975, doi: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
- [9] T. L. Saaty et M. S. Ozdemir, « Why the magic number seven plus or minus two », *Math. Comput. Model.*, vol. 38, n° 3, p. 233-244, août 2003, doi: 10.1016/S0895-7177(03)90083-5.
- [10] G. A. Miller, « The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. », *Psychol. Rev.*, vol. 63, n° 2, p. 81-97, 1956, doi: 10.1037/h0043158.
- [11] S.-J. Chen et C.-L. Hwang, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1992.
- [12] Hsi-Mei Hsu et Chen-Tung Chen, « Aggregation of fuzzy opinions under group decision making », *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 79, n° 3, p. 279-285, mai 1996, doi: 10.1016/0165-0114(95)00185-9.
- [13] Hsuan-Shih Lee, « An optimal aggregation method for fuzzy opinions of group decision », in *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028)*, Tokyo, Japan, 1999, vol. 3, p. 314-319, doi: 10.1109/ICSMC.1999.823219.
- [14] B. Bouchon-Meunier, *La logique floue et ses applications*. Paris: Addison-Wesley, 1995.
- [15] A. S. Cheliyan et S. K. Bhattacharyya, « Fuzzy fault tree analysis of oil and gas leakage in subsea production systems », *J. Ocean Eng. Sci.*, vol. 3, n° 1, p. 38-48, mars 2018, doi: 10.1016/j.joes.2017.11.005.
- [16] J. H. Purba, « A fuzzy-based reliability approach to evaluate basic events of fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment », *Ann. Nucl. Energy*, vol. 70, p. 21-29, août 2014, doi: 10.1016/j.anucene.2014.02.022.
- [17] M. Yazdi et S. Kabir, « A fuzzy Bayesian network approach for risk analysis in process industries », *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 111, p. 507-519, oct. 2017, doi: 10.1016/j.psep.2017.08.015.
- [18] S.-J. Chen et C.-L. Hwang, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making*, vol. 375. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992.
- [19] M. Rausand, *Risk assessment: theory, methods, and applications*. Hoboken, N.J: Wiley, 2011.
- [20] N. Khakzad, F. Khan, et P. Amyotte, « Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 96, n° 8, p. 925-932, août 2011, doi: 10.1016/j.res.2011.03.012.
- [21] A. Bobbio, L. Portinale, M. Minichino, et E. Ciancamerla, « Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks », *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 71, n° 3, p. 249-260, mars 2001, doi: 10.1016/S0951-8320(00)00077-6.
- [22] V. B. Dimitrijevic et J. R. Chapman, « Acceptability of the Risk Importance Measures in Evaluation of a Change », p. 10, 1996.
- [23] A. Wielenberg, C. Hasnaoui, et L. Burgazzi, « Risk Metrics for an extended PSA », 2016. [http://asampsa.eu/wp-content/uploads/2016/06/ASAMPSA\\_E-WP30-D30\\_5-RiskMetrics\\_Rev-5.pdf](http://asampsa.eu/wp-content/uploads/2016/06/ASAMPSA_E-WP30-D30_5-RiskMetrics_Rev-5.pdf) (consulté le mars 06, 2020).
- [24] W. G. Stillwell, D. A. Seaver, et W. Edwards, « A comparison of weight approximation techniques in multiattribute utility decision making », *Organ. Behav. Hum. Perform.*, vol. 28, n° 1, p. 62-77, août 1981, doi: 10.1016/0030-5073(81)90015-5.
- [25] B. M. Ayub, *Risk analysis in engineering and economics*. 2014.
- [26] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, 1985.
- [27] C.-L. Hwang, Y.-J. Lai, et T.-Y. Liu, « A new approach for multiple objective decision making », *Comput. Oper. Res.*, vol. 20, n° 8, p. 889-899, oct. 1993, doi: 10.1016/0305-0548(93)90109-V.
- [28] A. Hammami, « Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau », p. 395, 2003.
- [29] M. Yurdakul et Y. Tansel İÇ, « Application of correlation test to criteria selection for multi criteria decision making (MCDM) models », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 40, n° 3, p. 403-412, janv. 2009, doi: 10.1007/s00170-007-1324-1.

- [30] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, et J.-H. Zhao, « Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 9, p. 2263-2278, déc. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.021.