



HAL
open science

Vers une évaluation multicritère des gains des investissements sécurité relatifs à l'exploitation ferroviaire

Dabaj Anas, Letourneaux Fabien

► To cite this version:

Dabaj Anas, Letourneaux Fabien. Vers une évaluation multicritère des gains des investissements sécurité relatifs à l'exploitation ferroviaire. Congrès Lambda Mu 23 “ Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable ” - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. hal-03966657

HAL Id: hal-03966657

<https://hal.science/hal-03966657v1>

Submitted on 31 Jan 2023

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.

Vers une évaluation multicritère des gains des investissements sécurité relatifs à l'exploitation ferroviaire

DABAJ Anas
SNCF

1-3 avenue François Mitterrand – 93210 La Plaine Saint-Denis
anas.dabaj@sncf.fr

LETOURNEAUX Fabien
SNCF

1-3 avenue François Mitterrand – 93210 La Plaine Saint-Denis
fabien.letourneaux@sncf.fr

Résumé — Cet article propose une approche originale pour la valorisation multicritère des gains des investissements sécurité relatifs à l'exploitation ferroviaire. Des techniques d'aide à la décision sont proposées afin d'hierarchiser et de prioriser ces investissements dans le contexte de contraintes budgétaires.

Mots-clefs — *Investissements sécurité, Evaluation multicritère, TOPSIS, PROMETHEE, Knapsack*

Abstract—This paper proposes an original approach for the multi-criteria valorisation of safety investments related to railway operations. Decision support techniques are proposed in order to prioritize these investments in the context of budget constraints.

Keywords — *safety investments, multicriteria evaluation, TOPSIS, PROMETHEE, Knapsack*

I. INTRODUCTION

A. L'évaluation monocritère des investissements sécurité

La sécurité de l'exploitation ferroviaire (SEF) constitue l'un des maillons essentiels de la sécurité intégrée. A cet effet, SNCF Réseau définit annuellement une enveloppe budgétaire spécifique aux investissements destinés à la maîtrise de la SEF. Ces investissements couvrent un large spectre d'infrastructures et s'inscrivent également dans le cadre du contrat de performance de la SNCF avec l'État. Compte tenu de la contrainte des ressources financières, la priorisation et la hiérarchisation des investissements SEF sont essentielles. Dans ce sens, une première méthodologie de priorisation basée sur le rapport coûts-efficacité a été développée et appliquée par la SNCF.

Cet article propose une extension **multicritère** de cette méthode de priorisation. Il présente une démarche d'aide à la décision pour **hiérarchiser et prioriser ces investissements sécurité au-delà de leurs impacts sur l'accidentologie et l'incidentologie**, en introduisant des champs de valorisation complémentaires (Régularité, Facteurs Organisationnels et Humains, etc...). Il concourt donc au développement d'une approche de priorisation holistique capitalisant sur la méthode initiale.

B. Vers une évaluation multicritère des gains des investissements sécurité

Nous proposons une démarche méthodologique organisée en 5 étapes (cf. fig. 1) :

- La première étape consiste à recenser les investissements sécurité à évaluer. Ces derniers sont identifiés et proposés par l'entité responsable de la démarche de maîtrise de la SEF sur un périmètre du Réseau Ferré National.
- La deuxième étape consiste à délimiter les critères pertinents selon lesquels seront évalués les investissements. Ces critères regroupent à la fois un premier critère obligatoire (issu de la méthode initiale) qui évalue le ratio coût/nombre de vies épargnées de chaque investissement ainsi que des critères complémentaires tenant compte d'autres champs de valorisation.
- Les étapes suivantes (3 et 4) proposent de mettre en œuvre la méthode de pondération objective CRITIC afin d'allouer des poids aux critères d'évaluation selon leurs niveaux discriminants et selon leurs niveaux d'indépendance des autres critères. Ensuite, deux méthodes d'agrégation multicritères sont mises en œuvre (TOPSIS et PROMETHEE) afin d'évaluer l'utilité globale de chaque investissement selon deux hypothèses d'agrégation [1].
- La dernière étape consiste à exploiter cette utilité afin de proposer une hiérarchisation des investissements évalués par ordre de priorité [2], [3]. En complément de cette hiérarchisation, cet article propose une démarche de priorisation permettant le choix d'une combinaison d'investissements prioritaires, compatibles et qui maximisent la réduction du risque ferroviaire sans dépasser une enveloppe budgétaire définie par le décideur [4].

L'article présentera tout d'abord les différentes briques méthodologiques utilisées puis illustrera l'applicabilité de notre méthodologie pour le cas des investissements de sécurisation des passages à niveau. Enfin, nous discuterons

des perspectives de transpositions à d'autres investissements et des pistes d'amélioration potentielles de la méthode.

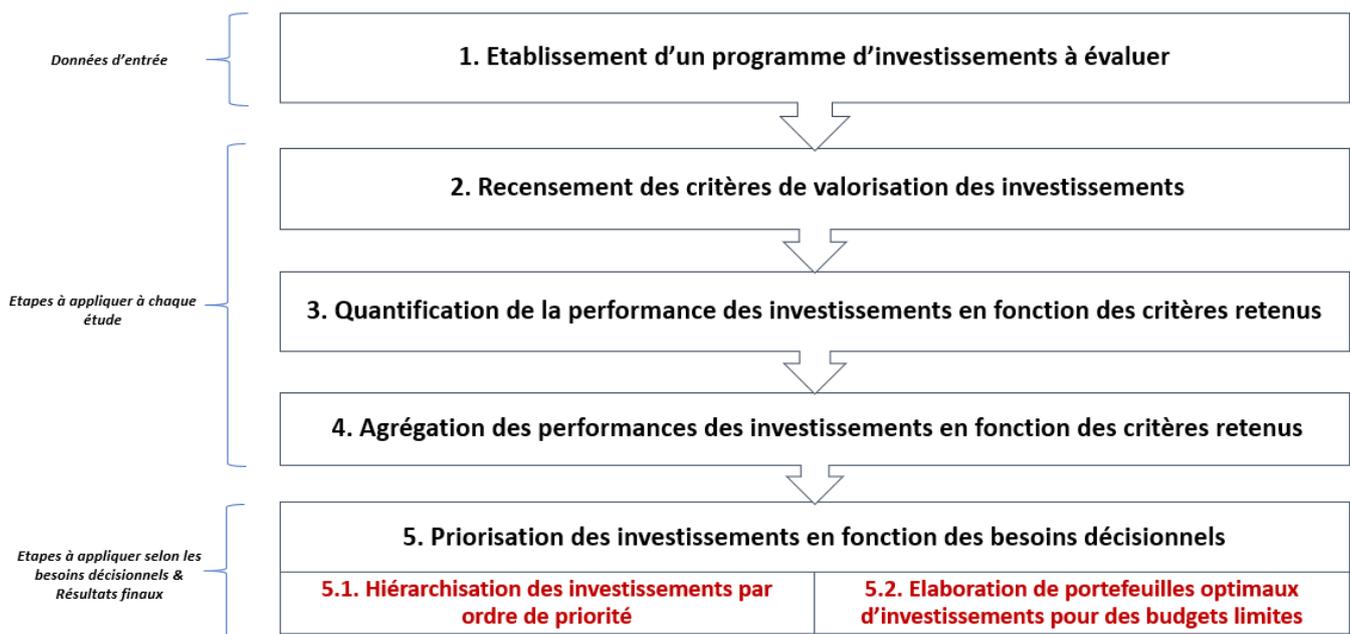


Figure 1: Méthodologie de valorisation multicritère des gains des investissements sécurité

II. Méthodologie d'évaluation et de priorisation multicritère des investissements sécurité

A. Etablissement d'un programme d'investissements

L'établissement d'un programme d'investissements constitue le point de départ de la démarche d'aide à la décision proposée. L'identification de ces investissements doit se fonder sur une analyse préalable des risques, permettant de justifier leur pertinence. Cette analyse des risques peut être menée selon la démarche proposée par la norme ISO 31000 pour le management des risques, aussi bien que les référentiels internes de la SNCF. Il est à préciser que les investissements à évaluer peuvent constituer des variantes candidates à la couverture d'un seul ou de plusieurs risques ferroviaires. La démarche d'aide à la décision proposée peut donc être mobilisée pour :

- **L'évaluation multicritère d'investissements permettant de maîtriser un seul risque ferroviaire**
(Ex. les variantes possibles d'investissements pour la sécurisation des Passages à Niveau)
- **L'évaluation multicritère d'investissements permettant la couverture de plusieurs risques ferroviaires**
(Ex. les variantes possibles d'investissements pour la sécurisation des Passages à Niveau & des Traversées de Voies Piétonnes)

B. Recensement des critères de valorisation

Suite à l'établissement d'un programme d'investissements, il est procédé au recensement des champs de valorisation et des critères permettant d'évaluer les performances de chaque investissement. Dans cette deuxième étape, Il est question de

mobiliser le critère coûts-efficacité et d'intégrer d'autres critères complémentaires afin d'aboutir à une valorisation globale de chaque investissement. L'objectif étant d'inclure d'autres critères permettant d'évaluer chaque investissement candidat selon d'autres perspectives pertinentes pour l'analyse. Ainsi, l'on distinguera deux catégories principales de champs de valorisation :

- Un champ de valorisation obligatoire : Il permet d'évaluer chaque investissement selon le critère coût/efficacité. **La prise en compte de ce champ de valorisation est systématique.**
- Des champs de valorisation complémentaires : Il s'agit de champs de valorisation **optionnels**, qui permettent l'évaluation de chaque investissement au-delà de leurs impacts sur l'accidentologie.

1) *Le champ de valorisation obligatoire : le rapport coûts-efficacité de l'investissement*

Le critère d'évaluation obligatoire est le **rapport coûts-efficacité** d'un investissement donné. Il est évalué comme étant le rapport entre le coût annuel de mise en œuvre de l'investissement (C_A) et la diminution du risque obtenue par la mesure rattachée à cet investissement (ΔR_p) :

$$RCE = \frac{C_A}{\Delta R_p}$$

La diminution du risque ΔR_p est évaluée comme suit :

$$\Delta R_p = R_p - E * R_p = R_p * (1 - E)$$

- R_p correspond au risque avant la mise en œuvre de l'investissement. Il décrit la valeur annuelle des dommages attendus :

$$R_p = f_i * C_i$$

f_i = Probabilité d'occurrence annuelle ou fréquence moyenne par an du risque SEF à traiter

C_i = conséquences potentielles du risque SEF à traiter

- **E correspond à l'efficacité de l'investissement.** L'efficacité mesure en pourcentage la capacité d'un investissement à réduire l'accidentologie. Deux cas de figures sont possibles selon la nature des mesures retenues dans le programme d'investissements :

➔ Investissement qui évite (supprime) le risque : Dans ce cas, l'efficacité de l'investissement peut être considérée égale à 100% (Ex: Suppression d'un Passage à Niveau)

➔ Investissement qui atténue (réduit) le risque en agissant sur ses causes (Barrières de prévention) ou ses conséquences (Barrières de protection) : Dans ce cas, l'efficacité de l'investissement peut être évaluée par analyse statistique de l'accidentologie ou par le recours aux jugements d'experts

2) Les champs de valorisation complémentaires

En plus du premier critère obligatoire (rapport coûts-efficacité), des champs de valorisation complémentaires sont

Table 1: : Champs de valorisation complémentaires et leurs descriptifs

Champs de valorisation	Descriptif
Régularité/ Ponctualité	Impact d'un investissement SEF sur l'évolution de la régularité/ponctualité
FOH	Impact d'un investissement SEF sur les facteurs organisationnels et humains. Il permet notamment de projeter la lumière sur les évolutions potentielles requises de structure, de moyens, de processus...
RNT	Impact d'un investissement SEF sur l'environnement ainsi que sur l'exposition aux risques naturels, technologiques et environnementaux.
Information Voyageur	Impact potentiel d'un investissement SEF sur la qualité de l'Information Voyageur
Impact Humain	Impact potentiel d'un investissement SEF sur le niveau d'engagement du personnel ainsi que sur l'évolution des risques psychosociaux
SST	Impact d'un investissement SEF sur l'évolution des accidents de travail et sur les maladies professionnelles.
Risque / Opportunité	Evaluation de la faisabilité, du niveau d'évolutivité, de la réversibilité et de la pérennité de l'investissement SEF
Cyber	Impact d'un investissement SEF sur les aspects de cybersécurité : cet investissement contribue-t-il à réduire le risque cyber sur le périmètre métier concerné, ou au contraire à augmenter sa surface d'exposition et d'attaque potentielle, et dans ce cas, est-ce de manière significative ?

C. Quantification des performances des investissements en fonction des champs de valorisation

La performance de chaque investissement SEF doit ensuite être quantifiée vis-à-vis de chacun des champs de valorisation. Pour ce faire, des critères pour chacun d'eux ont été établis (cf. table 3). Notons qu'en fonction de la disponibilité des données et du niveau de détail exigé par le décideur, deux cas de figure sont possibles pour déterminer la valeur quantitative de ces critères :

proposés ici sur la base d'ateliers de travail organisés avec les experts ferroviaires ayant contribué à l'élaboration de la méthodologie présentée dans cet article. Ces champs de valorisation couvrent notamment l'impact potentiel des investissements SEF évalués sur :

- La Régularité et/ou la Ponctualité du trafic ferroviaire
- Les Facteurs Organisationnels et Humains (FOH)
- L'environnement et les risques naturels et technologiques (RNT)
- L'information voyageur
- Le Leadership Humain
- La Santé et Sécurité au Travail (SST)
- Les risques et les opportunités liés au projet d'investissement.
- Le risque Cyber

La table 1 précise la définition et le périmètre d'application de chacun de ces champs de valorisation. Notons que la prise en compte de ces champs complémentaires doit se faire en adéquation avec la nature des investissements à évaluer ainsi que du contexte décisionnel. Par ailleurs, soulignons que la liste des champs de valorisation complémentaires proposés ici n'est pas restrictive. Elle constitue uniquement une base de réflexion qu'il convient d'adapter, voire d'enrichir, en fonction des besoins d'évaluation et d'analyse.

- En cas de disponibilité des données, la valeur quantitative de ces critères est intégrée à partir des bases de données de référence de la SNCF.

- En cas d'indisponibilité des données ou en cas de ressources limitées (budgets/temps) pour la mise en œuvre de l'analyse, une quantification des critères peut être fastidieuse et peu réaliste. Dans ce cas, une échelle de préférence est proposée (cf. table 2) afin que le décideur choisisse la valeur qui lui semble la plus vraisemblable pour évaluer le programme d'investissements selon un critère donné.

Table 2: : Echelle de préférence pour l'évaluation quantitative des critères

Quantificateur linguistique	Valeur Quantitative associée
Impact négatif très haut	-5
Impact négatif haut	-4
Impact négatif moyen	-3
Impact négatif faible	-2
Impact négatif très faible	-1
Pas d'impact	0
Impact positif très faible	1
Impact positif faible	2
Impact positif moyen	3
Impact positif haut	4
Impact positif très haut	5

D. Agrégation des performances des investissements

Afin de construire/consolider une évaluation globale, il est nécessaire de procéder à l'agrégation des performances de chaque investissement sur l'ensemble de ces critères (cf. fig.1). Cette étape d'agrégation permet d'aboutir à un score représentant l'**utilité globale** de chaque investissement. Celle-ci sera ensuite mobilisée dans l'étape finale de priorisation et d'hierarchisation des investissements évalués (cf. section E).

L'agrégation des performances (i.e. le calcul de leur utilité) nécessite la mise en œuvre successive de deux étapes :

- **La pondération des critères** afin d'allouer des poids différenciés selon leurs importances relatives.
- **L'agrégation multicritère** afin d'évaluer l'utilité globale de chaque investissement en tenant compte des poids des critères et de la performance des investissements selon chaque critère.

1) Choix de méthodes de pondération et d'agrégation multicritère

On distingue essentiellement deux familles de méthodes de pondération des critères: **les méthodes de pondération subjectives et les méthodes de pondération objectives** [5], [6]:

- Les méthodes subjectives permettent d'assigner des poids, **en s'appuyant sur les préférences du décideur**. Cela est uniquement possible **dans les situations où ce dernier peut se prononcer sur l'importance relative des différents critères**.
- Les méthodes objectives permettent de pondérer les critères non pas en fonction des préférences du décideur, mais plutôt en fonction de la qualité ainsi que de la quantité d'informations qu'ils fournissent.

Nous retenons ici une démarche de pondération objective. Ce choix se justifie par le fait qu'il n'est pas toujours possible pour le décideur de proposer et justifier une pondération subjective pour les critères. En outre, il nous semble plus pertinent que les poids traduisant l'importance relative de

chaque critère soient issus d'une démarche reflétant leur importance intrinsèque, afin d'éviter toute introduction de biais dans le processus décisionnel. En particulier, **nous retenons la méthode de pondération objective « CRITIC » qui apparait la plus adaptée pour notre contexte d'aide à la décision** [7].

Deux approches de résolution sont possibles pour l'agrégation multicritère, **les approches du critère unique de synthèse et les approches de surclassement de synthèse** [8]–[11].

Les approches du critère unique de synthèse sont généralement utilisées dans un contexte d'analyse de risque lorsque l'on tolère la compensation entre les critères en vue de prendre des décisions rapides ou en vue de systématiser la prise de décision [1]. Les approches de surclassement de synthèse quant à elles, sont plutôt à privilégier lorsque le décideur souhaite faire émerger l'incomparabilité entre les investissements à évaluer (i.e. ne tolère pas la compensation entre les critères) [1].

Dans le contexte de notre démarche, le décideur peut se trouver dans l'une ou l'autre de ces situations selon ses besoins. **Cela conduit à proposer l'utilisation de ces deux démarches à la fois, notamment à travers l'application de la méthode TOPSIS (méthode d'agrégation totale) et PROMETHEE II (méthode d'agrégation partielle). L'application de ces deux méthodes en parallèle peut aboutir à proposer des résultats différents au décideur/commanditaire de l'analyse qui devra alors arbitrer.**

Dans les sections suivantes, nous revenons sur le principe de mise en œuvre de ces méthodes sans aborder les développements mathématiques qui leur sont inhérents. Le lecteur intéressé par ces développements peut consulter [8]–[11].

2) Pondération objective des critères par la méthode CRITIC (Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation) [7]

La méthode s'appuie sur :

- ➔ **Le pouvoir discriminant des critères (niveau de dispersion des performances des investissements évalués).**
- ➔ **Le niveau de conflit entre les critères (niveau de discordance et d'indépendance des critères).**

Outre le pouvoir discriminant, la méthode CRITIC précise qu'un critère est d'autant plus important qu'il apporte des informations discordantes et conflictuelles par rapport aux autres critères [7]. En effet, un problème d'aide à la décision où les critères retenus sont majoritairement concordants est en quelque sorte trivial, dans la mesure où la détermination des investissements prioritaires ne nécessite pas forcément le recours à une méthode d'aide à la décision.

Table 3: Critères d'évaluation des investissements

Champs de valorisation		Critères	Définition
Champs complémentaires	Régularité/ Ponctualité	Evolution du trafic	Impact potentiel d'un investissement SEF sur l'évolution du trafic ferroviaire (évolution du nombre de voyageurs, du volume transporté, ou de la capacité commerciale vendue).
		Evolution de la gestion des actifs	Impact sur la gestion des actifs : disponibilité des installations & utilisation des ressources
		Impact pénalités / Remboursements	Impact sur l'évolution des bonus/malus ainsi que des remboursements contractuels
	FOH	Evolution de la structure de l'organisation	Impact sur l'évolution du fonctionnement des services, sur l'organisation ainsi que sur le nombre de ressources humaines
		Evolution de l'effort de Formation / Habilitation	Impact sur le programme de formation et des requis d'habilitation
		Evolution des Processus / des Procédures	Impact sur l'effort nécessaire pour l'adaptation des processus et des procédures actuelles
		Evolution des Moyens	Impact sur les moyens techniques et sur les outils nécessaires au fonctionnement des services
	RNT	Exposition aux RNT et risques environnementaux	Impact sur le niveau d'exposition aux risques naturels (mouvements de terrain, inondations ...), technologiques (transports matières dangereuses, zone SEVESO ...) et environnementaux (faune sauvage)
	Information Voyageur	Indicateur de réactivité de l'Information Voyageur	Impact sur les performances de l'indicateur de réactivité de l'information voyageur
		Pénalités dues au déficit de l'information Voyageurs en Gare	Impact sur l'évolution des coûts liés à la dégradation de l'information voyageur
	Impact Humain	Impact humain	Impact sur l'évolution des risques psychosociaux et du nombre d'inaptitudes au travail
		Engagement du personnel	Impact sur le niveau d'engagement et de satisfaction du personnel
	SST	Evolution des Accidents du travail	Impact sur l'évolution des accidents de travail
		Evolution des Maladies professionnelles	Impact sur l'évolution des maladies professionnelles
	Risque/Opportunité	Reversibilité	Potentiel de réversibilité d'un investissement au sens technique et/ou économique
		Planning projet	Niveau de complexité du planning relatif à investissement SEF
		Evolutions réglementaires et juridiques	Niveaux de pérennité et de viabilité d'un investissement SEF vis-à-vis du contexte réglementaire à venir
Image de l'entreprise (Marque et Communication)		Impact de la mise en œuvre (ou de la non mise en œuvre) d'un investissement SEF sur l'image de marque de l'entreprise	
Cyber	Exigences sécurité cyber	Impact sur les exigences sécurité cyber. Il est évalué en fonction de l'effort requis pour la mise en conformité vis à vis des exigences cyber.	
	Risques résiduels	Impact sur les risques résiduels Cyber après l'effort de mise en conformité.	

Par ailleurs, dans une grande partie de problèmes d'aide à la décision, **les critères utilisés ne sont pas parfaitement indépendants, ce qui pourrait introduire des biais dans le processus décisionnel**. A ce sujet, **les auteurs de cette méthode précisent que [7]:**

- **D'une part, la suppression arbitraire d'un ou de plusieurs critères interdépendants entrainerait une perte d'une partie d'informations plus ou moins utiles pour éclairer la prise de décision.**
- **D'autre part, l'intégration totale de ces critères risquerait de produire des résultats erronés** (non-respect de l'axiome de non-redondance).

Pour pallier ces écueils, la méthode CRITIC propose un processus de pondération original qui permet d'attribuer les plus grands poids aux critères **les plus discriminants et les plus indépendants des autres critères, et vice versa**. Plus précisément (cf. Figure 2) :

- Le niveau discriminant de chaque critère est évalué par **la variance statistique**. Celle-ci permet de quantifier la dispersion des performances des actions sur un critère donné.
- Le niveau d'interdépendance entre les critères est quantifié quant à lui, à travers le calcul du **coefficient de corrélation statistique** entre chaque paire de critères.

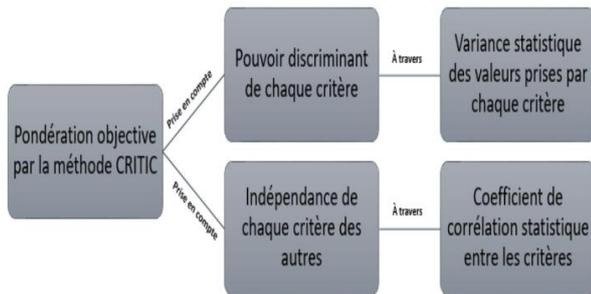


Figure 2: Principe de pondération par la méthode CRITIC

3) Agrégation multicritère par TOPSIS et/ou PROMETHEE II

Les méthodes TOPSIS et PROMETHEE II présentent l'avantage d'assurer la traçabilité des résultats qu'elles fournissent aussi bien que leurs aspects intuitifs et intelligibles [3]. Nous en présentons ici le principe.

Principe de la méthode TOPSIS

TOPSIS : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution [12] figure parmi les méthodes les plus utilisées pour la résolution des problèmes d'aide à la décision multicritère [13]. Le principe fondamental de cette méthode consiste à identifier une solution qui se rapproche le plus possible de la solution idéale (**solution ayant les meilleures évaluations sur l'ensemble des critères**) et qui s'éloigne le plus de la solution anti-idéale (**solution ayant les moins bonnes évaluations sur l'ensemble des critères**). Ainsi, **les actions sont rangées de la meilleure à la moins bonne en**

fonction de leurs distances pondérées à l'idéale et à l'anti-idéale.

A titre d'exemple, considérons les cinq investissements (A,,C,D,E) illustrées dans la Figure 3, et qui sont évaluées selon les deux critères C_1 et C_2 . Les solutions idéales et anti-idéales sont représentées respectivement par les deux points « Idéal » et « Anti-idéal ». En supposant que les deux critères C_1 et C_2 ont le même poids et que l'on utilise la distance euclidienne, on peut alors constater que l'action C est la plus proche de la solution idéale, tandis que l'action D est la plus éloignée de la solution anti-idéale. La méthode TOPSIS résout le dilemme du choix entre l'idéale et l'anti-idéale, en utilisant une distance pondérée à l'idéale et à l'anti-idéale [14].

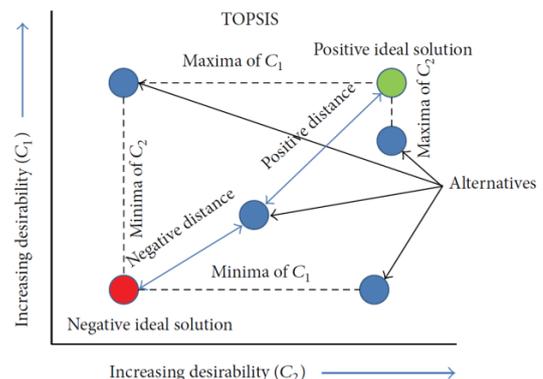


Figure 3: Principe de la méthode TOPSIS

Principe de la méthode PROMETHEE II :

PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations) est une famille de méthodes d'aide à la décision de surclassement (d'agrégation partielle) développée par [2]. Parmi les méthodes PROMETHEE, on distingue PROMETHEE II qui est particulièrement adaptée au problèmes décisionnels de rangement [15].

En effet, la méthode PROMETHEE II permet d'établir un pré-ordre complet entre les actions, en évacuant toute notion d'incomparabilité. Le lecteur intéressé par plus de détails sur cette méthode peut consulter [15].

E. Hiérarchisation et priorisation des investissements en fonction des besoins décisionnels

La mise en œuvre de la démarche permet de proposer au décideur deux types de résultats décisionnels : la **hiérarchisation** et la **priorisation** des investissements sécurité.

1) Hiérarchisation multicritère des investissements sécurité

La **hiérarchisation** ordonne les investissements par ordre de priorité, tous critères confondus (cf. fig. 4) et propose ainsi une vision globale au décideur sur leur priorité relative.

1. Hiérarchiser les investissements par ordre de priorité

Niveau de priorité de l'investissement	Rang de l'investissement
Investissements les plus prioritaires	1,2,..
Investissements prioritaires	...
Investissements moyennement prioritaires	
Investissements peu prioritaires	n

Max
Priorité décroissante de l'investissement
Min

Figure 4: Hiérarchisation des investissements par ordre de priorité

Les étapes à mettre en œuvre sont :

- Etape 1 : Etablissement d'un programme d'investissements & Recensement des critères d'évaluation (cf. sections II.A, II.B & II.C)
- Etape 2 : Pondération objective des critères par la méthode CRITIC (cf. section II.C)
- Etape 3 : Application des deux méthodes TOPSIS et/ou PROMETHEE II afin de quantifier l'utilité globale R_i de chaque investissement évalué (cf. section II.D)
- Etape 4 : Rangement des investissements par ordre de priorité décroissante en fonction de la valeur de R_i & Analyse des résultats (cf. section II.D)

2) Constitution de portefeuilles optimaux d'investissements

Le deuxième besoin décisionnel satisfait par la méthodologie proposée dans cet article consiste à assister un décideur dans la constitution de portefeuilles optimaux pour la maîtrise des risques. Cette démarche peut notamment appuyer la **sélection d'une combinaison d'investissements qui maximisent la réduction des risques pour un budget prédéfini tout en identifiant la priorité relative de chaque investissement** (cf. fig.5).

2. Elaboration de portefeuilles optimaux d'investissements pour des budgets pré-établis

Investissements	Coût	Utilité	Choix	Ordre de priorité
Invest 1	C1	U1	Retenu	5
Invest 2	C2	U2	Écarté	-
Invest 3	C3	U3	Retenu	3
Invest 4	C4	U4	Retenu	4
Invest 5	C5	U5	Écarté	-
Invest 6	C6	U6	Retenu	1
...
Invest n	Cn	Un	Retenu	2
Utilité totale des investissements retenus	$\sum U_i$			
Coût global des investissements retenus	$\sum C_i$			
Budget limite	B			

Figure 5: Constitution de portefeuilles optimaux d'investissements

L'utilité globale R_i d'un investissement (cf. section II.E.1) est ainsi exploitée afin de **formuler un problème d'optimisation qui maximise la réduction des risques pour une enveloppe budgétaire limitée** [4]. La formulation mathématique de ce problème est donnée ci-après :

$$\max R(x) = \sum_{i=1}^n U_i * x_i$$

soit **soit** $\sum_{i=1}^n c_i * x_i \leq C$

(en cas d'incompatibilité entre les investissements) $\sum_{j=1}^l x_j \leq 1$

Avec $x_i \in \{0, 1\}$

$U_i = R_i$

- La première équation traduit le fait que l'on souhaite retenir une combinaison d'investissements qui maximise la somme de leurs utilités individuelles. Cette utilité globale du programme (portefeuille) d'investissements que l'on cherche à maximiser est notée $R(x)$.
- Ensuite, comme chaque investissement candidat est caractérisé par un coût individuel c_i et que l'on souhaite que le coût global de la combinaison retenue ne dépasse pas un budget total C , une première contrainte linéaire est ajoutée au modèle, exprimée par la première inégalité encadrée
- Enfin, afin de tenir compte des éventuelles incompatibilités entre les investissements, des contraintes supplémentaires pour imposer l'exclusion par exemple peuvent être ajoutées au modèle comme exprimée par la deuxième inégalité
- x_i est la variable de décision. $x_i = 0$ quand l'investissement est écarté et $x_i = 1$ quand il est retenu

III. Application de la méthodologie pour le cas des investissements de sécurisation des Passages à Niveau

A. Identification des investissements à évaluer

Dans cette troisième partie, nous illustrons la mise en œuvre de notre méthodologie d'évaluation multicritère des investissements sécurité. Le cas d'étude traité est celui de la **hiérarchisation multicritère et de la priorisation des investissements de sécurisation des passages à niveau (PN) contre les risques de heurt et de collision**.

Ce cas d'étude est basé sur les données et les résultats d'une analyse coût-efficacité réalisée par SNCF pour évaluer ces investissements. Il s'agit donc ici de compléter cette première analyse coût-efficacité par une analyse multicritère. Les investissements évalués concernent trois types de PN :

- Les PN de type Croix de Saint André,
- Les PN à Signalisation Automatique Lumineuse 2 (SAL2)
- Les PN à Signalisation Automatique Lumineuse 4 (SAL4)

Les mesures de sécurisation rattachées à ces investissements sont comme suit :

- ➔ Pour les PN de type **Croix de St André**
 - Suppression simple

- Transformation en PN Nouvelle Génération
- ➔ Pour les PN de type **SAL2 et SAL4**
 - SAL2 vers suppression totale
 - SAL2 vers SAL4
 - SAL2 vers Détecteur d'Objet, couplé avec radar de franchissement
 - SAL 4 avec Détecteur d'Objet
 - SAL2 vers SAL2 avec radar seul
 - SAL2/4 équipés avec : stickers + feux R24 à diodes + signalisation sol
 - SAL 2/4 vers SAL2/4 avec vidéo protection
 - SAL 2 vers SAL2 avec vidéo-verbalisation
 - SAL2 vers SAL2 avec mise en place d'îlots séparateurs de trafic routier

afin de limiter les biais et d'aboutir à des évaluations justes et vraisemblables. La table 4 recense l'évaluation des mesures selon le critère coûts-efficacité ainsi que la moyenne des évaluations du panel d'experts sur l'ensemble des critères de valorisation retenus.

Dans la suite de cet article, ces mesures seront anonymisées et notées aléatoirement M_i .

B. Recensement des critères d'évaluation

Suite à cette première étape d'identification des mesures de mitigation possibles pour la sécurisation des Passages à Niveau (i.e. Programme d'investissements), un panel d'experts internes a procédé au recensement des champs de valorisation complémentaires et des critères pertinents pour tenir compte de l'ensemble de leurs gains et de leurs impacts au-delà du seul ratio coût-efficacité. La sélection suivante est obtenue :

- Impact des mesures de mitigation sur la Régularité/Ponctualité
- Impact des mesures de mitigation sur l'Evolution de la structure de l'organisation
- Impact des mesures de mitigation sur l'Evolution de l'effort de Formation / Habilitation
- Impact des mesures de mitigation sur l'Evolution des Processus/ des Procédures
- Impact des mesures de mitigation sur l'Evolution des Moyens
- Impact des mesures de mitigation sur l'Environnement
- Impact des mesures de mitigation sur l'Evolution des risques psychosociaux
- Evolutivité des mesures de mitigation
- Réversibilité des mesures de mitigation

C. Quantification de la performance des investissements en fonction des critères complémentaires

Suivant l'identification des critères de valorisation complémentaires au ratio coût-efficacité, nous avons procédé à la quantification de la performance de chaque investissement vis-à-vis de ces critères. Pour faciliter l'exercice d'évaluation, une échelle de préférence qualitative est proposée (cf. table 2) afin que chaque expert choisisse la valeur qui lui semble la plus pertinente pour évaluer chaque mesure de mitigation selon un critère donné.

Après cette phase d'évaluation qualitative, nous avons associé les valeurs quantitatives aux évaluations de chaque expert. Nous avons finalement moyenné leurs évaluations

Table4 : Quantification des performances des mesures de sécurisation des PN

Investissements à évaluer	Coût/Efficacité	Régularité/Ponctualité	Evolution de la structure de l'organisation	Evolution de l'effort de Formation / Habilitation	Evolution des Processus/ des Procédures	Evolution des Moyens	Environnement	Evolution des risques psychociaux	Evolutivité de l'investissement	Reversibilité de l'investissement
M1	1,60	3,33	1,67	0,00	2,33	0,67	0,00	0,67	0,00	0,00
M2	8,30	0,67	-1,33	-1,33	-1,67	-1,67	-0,67	0,00	0,00	-1,33
M3	62,80	4,67	3,33	3,00	4,00	3,00	1,67	1,00	0,00	0,00
M4	19,70	-1,67	0,00	0,00	-0,33	0,00	-0,33	0,67	0,00	-0,67
M5	34,10	-3,33	-3,00	-2,67	-3,00	-3,33	-0,67	2,33	-0,67	-1,33
M6	3,40	0,00	0,00	0,00	-1,00	-0,50	0,00	0,00	-1,00	-0,67
M7	28,50	-1,33	-3,00	-2,67	-3,00	-3,33	-1,00	0,33	-0,67	-1,33
M8	5,70	1,67	0,00	-0,67	-1,33	-1,33	-1,00	0,67	0,33	0,33
M9	7,10	1,00	0,00	1,00	-0,67	1,00	-0,67	1,00	0,67	1,33
M10	6,80	1,67	0,00	0,67	-1,33	-0,33	-0,33	1,33	0,67	0,67
M11	12,30	2,00	-3,00	-1,67	-0,67	-3,33	-0,67	0,33	-1,00	1,33
M12	2,10	2,67	-3,50	-2,00	-1,00	-3,33	-0,67	0,33	-1,00	0,00
M13	7,00	0,67	0,00	0,00	-0,33	0,00	-0,67	0,00	-1,00	1,00
M14	0,60	0,00	0,00	-0,33	-0,33	0,00	0,00	1,33	-0,33	0,00
M15	51,00	-1,00	-1,00	-0,67	-2,33	-3,00	-0,67	2,33	1,00	1,33
M16	6,46	-0,33	-2,00	-1,33	-1,67	-1,67	0,00	0,00	-0,67	-1,33
M17	8,20	1,67	0,00	-0,67	-1,33	-1,33	-1,00	-0,67	0,67	-0,33
M18	10,20	-0,33	0,00	1,00	-0,67	1,00	-0,67	1,00	1,67	0,67
M19	9,70	-0,67	0,00	0,67	-1,33	-0,33	-0,33	1,33	0,67	1,00
M20	21,40	2,00	-3,00	-1,67	-0,67	-3,33	-0,67	0,33	-1,33	1,00
M21	3,74	2,67	-3,50	-2,00	-1,00	-3,33	-0,67	0,33	-1,00	0,00

D. Pondération objective des critères

En nous appuyant sur la matrice des performances (table 4) caractérisant chaque mesure de sécurisation des PN, la mise en œuvre de la méthode CRITIC a permis d'aboutir à la pondération objective fournie dans la table 5.

Table 5 : Pondération objective des critères

Critères	Poids
Ratio Coût/Efficacité	0,124
Régularité/Ponctualité	0,106
Evolution de la structure de l'organisation	0,076
Evolution de l'effort de Formation / Habilitation	0,064
Evolution des Processus/ des Procédures	0,071
Evolution des Moyens	0,087
Environnement	0,074
Evolution des risques psychosociaux	0,124
Evolutivité de l'investissement	0,115
Reversibilité de l'investissement	0,159

Table 6 : Ordre de priorité global des mesures de sécurisation des PN

Infrastructure	Investissements à évaluer	Utilité	Rang
PN SAL2	M9	0,621558398	1
PN SAL2	M3	0,61646896	2
PN SAL2	M10	0,604876009	3
PN Croix Saint Andre	M1	0,600784633	4
PN SAL4	M18	0,599699238	5
PN SAL4	M19	0,576228462	6
PN SAL4	M5	0,520461951	7
PN SAL2	M8	0,516423329	8
PN SAL4	M14	0,512249461	9
PN SAL2	M12	0,490357313	10
PN SAL2	M10	0,477283573	11
PN SAL4	M17	0,451357372	12
PN SAL4	M20	0,438249495	13
PN SAL2	M11	0,424871098	14
PN SAL4	M21	0,422236302	15
PN SAL2	M4	0,400924597	16
PN SAL2	M6	0,396490478	17
PN Croix Saint Andre	M2	0,364101143	18
PN SAL4	M16	0,332906441	19
PN SAL2	M15	0,306847844	20
PN SAL2	M7	0,226127517	21

2) Interprétation des résultats

Les résultats obtenus à travers la mise en œuvre de la démarche proposée permettent d'aboutir à une vision globale sur la priorité relative de l'ensemble des mesures possibles pour la sécurisation des passages à niveau Croix Saint André et SAL 2/ SAL 4. Cela apporte des éléments d'appui dans les situations où un décideur souhaite réduire l'accidentologie sur son périmètre de façon opportuniste et conjoncturelle. Autrement dit, cette vision globale sur la priorité relative des mesures de mitigation permettra d'identifier sur un périmètre donné, **le type de PN dont la sécurisation est la plus prioritaire ainsi que la mesure de sécurisation qu'il convient de déployer.**

E. Hiérarchisation des mesures de sécurisation

1) Agrégation multicritère par TOPSIS

Suite à cette étape de pondération des critères, nous avons procédé à la résolution du problème décisionnel de hiérarchisation des mesures de sécurisation des PN en tenant compte de leurs performances sur l'ensemble des critères d'évaluation. Par souci de simplification, nous avons supposé que le décideur tolère **la compensation** entre les critères. Cette hypothèse nous a permis de privilégier l'application de la méthode TOPSIS pour l'agrégation des performances de l'ensemble des mesures de mitigations.

On aboutit à la hiérarchisation des mesures de sécurisation des passages à Niveau fournie dans la table 6. Cette dernière précise l'utilité globale calculée de chaque investissement ainsi que son ordre de priorité.

F. Priorisation des mesures de sécurisation

Afin de mieux illustrer l'approche proposée pour l'allocation optimale des mesures de mitigation sur un périmètre donné, supposons que l'on a identifié 8 PN dont la sécurisation est nécessaire. Pour chacun de ces 8 PN, supposons que des mesures de mitigation ont été identifiées (cf. table 7). Chaque mesure est caractérisée par un coût annuel c_i et par une utilité U_i obtenue à l'issue de la mise en œuvre de la méthode TOPSIS (cf. table 6).

En outre, supposons que le décideur dispose d'une enveloppe budgétaire annuelle équivalente à 55 keuros et qu'il souhaite investir de manière optimale dans l'allocation des mesures de mitigation.

L'objectif d'allocation optimale des barrières de sécurité peut être exprimé par le problème du sac à dos suivant :

$$\max R(x) = \sum_{i=1}^{17} U * x_i$$

sujet aux contraintes : $\sum_{i=1}^{17} c_i * x_i \leq 55$ keuros Annuellement

(Exclusivité entre M3, M4, M5) $x_{M3} + x_{M4} + x_{M5} \leq 1$

(Exclusivité entre M6 et M7) $x_{M6} + x_{M7} \leq 1$

(Exclusivité entre M8 et M9) $x_{M8} + x_{M9} \leq 1$

(Exclusivité entre M10 et M11) $x_{M10} + x_{M11} \leq 1$

(Exclusivité entre M12 et M13) $x_{M12} + x_{M13} \leq 1$

(Exclusivité entre M14, M15, M16 et M17) $x_{M14} + x_{M15} + x_{M16} + x_{M17} \leq 1$

Avec $x_{Bi} \in \{0, 1\}$

Les résultats obtenus à travers la résolution du problème d'optimisation formulé permettent de faciliter le **choix d'une combinaison de mesures de mitigation les plus utiles sans pour autant dépasser un budget prédéfini** : pour chaque mesure candidate à la sécurisation d'un PN donné, le décideur pourra identifier s'il faut la déployer ou pas ainsi que sa priorité par rapport aux autres mesures. Cette démarche peut être ainsi utilisée pour l'élaboration de stratégie efficace pour le traitement et la maîtrise des risques d'accidentologie sur le parc de PN.

Les résultats sont fournis dans la table 7

Table7 : Résultats de la démarche d'allocation optimale des mesures de mitigation

PN candidats à la sécurisation	Indice barrière	Coût annuel équivalent(keuros)	Utilité	variable de décision	contrainte	décision
PN Croix Saint Andre 1	M1	7,8	0,600784633	1		retenue
PN Croix Saint Andre 2	M2	25	0,364101143	1		retenue
PN SAL2 3	M9	7,3	0,621558398	1	1	retenue
PN SAL2 3	M3	640	0,61646896	0		écartée
PN SAL2 3	M10	9	0,604876009	0		écartée
PN SAL2 4	M8	1,8	0,516423329	1	1	retenue
PN SAL2 4	M13	8,7	0,490357313	0		écartée
PN SAL2 5	M11	19	0,477283573	0	1	écartée
PN SAL2 5	M12	3,7	0,424871098	1		retenue
PN SAL4 6	M18	7,3	0,599699238	1	1	retenue
PN SAL4 6	M19	9	0,576228462	0		écartée
PN SAL4 7	M15	74	0,520461951	0	1	écartée
PN SAL4 7	M14	0,1	0,512249461	1		retenue
PN SAL4 8	M17	1,8	0,451357372	1	1	retenue
PN SAL4 8	M20	19	0,438249495	0		écartée
PN SAL4 8	M21	3,7	0,422236302	0		écartée
PN SAL4 8	M16	3,8	0,332906441	0		écartée
Utilité globale						4,09104467
Coût global						54,8
Budget limite						55

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous proposons dans cette communication une approche méthodologique pour la valorisation multicritère des gains des investissements sécurité relatifs à l'exploitation ferroviaire. Cette démarche a pour objectif d'aider les décideurs dans le processus d'hierarchisation et de priorisation des investissements sécurité.

Nous avons présenté dans un premier temps les différentes briques méthodologiques utilisées dans la consolidation de notre approche. Ensuite, nous avons illustré sa mise en œuvre pratique pour le cas des investissements de sécurisation des passages à niveau. Les résultats obtenus

sont cohérents et en concordance avec les attentes opérationnelles des experts ferroviaires multi-métiers ayant contribué au développement de notre démarche.

En perspective de ces premiers travaux, une mise en œuvre élargie pour d'autres programmes d'investissements – autres que les PN- permettrait de consolider et de conforter la pertinence et la plus-value de la méthodologie développée. Des approches méthodologiques différentes de pondération et d'agrégation multicritère seraient également mis en œuvre afin de conforter la robustesse de notre démarche méthodologique.

REFERENCES

- [1] M. Merad, *Aide à la décision et expertise en gestion des risques*. Lavoisier, 2010.
- [2] J.-P. Brans et Y. De Smet, « PROMETHEE Methods », in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, S.

- Greco, M. Ehrgott, et J. R. Figueira, Éd. New York, NY: Springer, 2016, p. 187-219. doi: 10.1007/978-1-4939-3094-4_6.
- [3] E. Roszkowska, « MULTI-CRITERIA DECISION MAKING MODELS BY APPLYING THE TOPSIS METHOD TO CRISP AND INTERVAL DATA », *Multi. Criteria Decis. Mak.*, vol. 6, p. 200-230, 2011.

- [4] H. Kellerer, U. Pferschy, et D. Pisinger, *Knapsack Problems*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] N. H. Zardari, K. Ahmed, S. M. Shirazi, et Z. B. Yusop, *Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management*. Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-12586-2.
- [6] 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.
- [7] D. Diakoulaki, G. Mavrotas, et L. Papayannakis, « Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method », *Comput. Oper. Res.*, vol. 22, n° 7, p. 763-770, août 1995, doi: 10.1016/0305-0548(94)00059-H.
- [8] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, 1985.
- [9] B. Roy et D. Bouyssou, *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. Paris: Economica, 1993.
- [10] P. Vincke, *L'aide multicritère à la décision*. Bruxelles, Belgique : Paris, France: Editions de l'Université de Bruxelles ; Editions Ellipses, 1989.
- [11] A. Schärli, *Décider sur plusieurs critères: panorama de l'aide à la décision multicritère*, 1re éd. Lausanne: Presses polytechniques romandes, 1985.
- [12] C.-L. Hwang et K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making*, vol. 186. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9.
- [13] M. Behzadian, S. Khanmohammadi Otaghsara, M. Yazdani, et J. Ignatius, « A state-of the-art survey of TOPSIS applications », *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, n° 17, p. 13051-13069, déc. 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.05.056.
- [14] L. Azzabi, « Contribution à l'amélioration d'un système de production: Intégration de la méthode six sigma et approche multicritère d'aide à la décision dans SIDELEC INTERNATIONALE », Thèse de doctorat, Université d'Angers, 2010.
- [15] J.-P. Brans et B. Mareschal, « Promethee Methods », in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, vol. 78, New York: Springer-Verlag, 2005, p. 163-186. doi: 10.1007/0-387-23081-5_5.