DROC

Dynamic Residual Operational Capacity

De l'optimisation d'itinéraire à l'orchestration de la capacité opérationnelle

Un cadre fédéré pour la mobilité multimodale cyber-physique

From Route Optimization to Operational Capacity Orchestration

A Federated Framework for Cyber-Physical Multimodal Mobility

Issame Garchali

GI Consulting Mobility & Ecological Innovation (GICMEI)
Mobility Systems • Rail • Energy • Operations & Maintenance

Cadre conceptuel & agenda de recherche | Conceptual Framework & Research Agenda

Preprint — Version 1.1 — 24 August 2026 | **DOI: 10.5281/zenodo.22078162**

Statut scientifique / Scientific status

Cadre conceptuel non évalué par les pairs. Les performances du cadre DROC restent à démontrer par revue systématique et simulation comparative.
Conceptual framework not peer-reviewed. Performance claims for DROC remain to be tested through systematic review and comparative simulation.

Résumé exécutif / Executive Abstract

FRANÇAIS	ENGLISH
Les outils de navigation et les plateformes MaaS optimisent de mieux en mieux les itinéraires individuels, mais une recommandation localement rationnelle peut produire une congestion collective lorsqu'elle est appliquée simultanément à grande échelle. Ce papier propose de déplacer la variable centrale de l'optimisation multimodale vers la capacité opérationnelle résiduelle dynamique — Dynamic Residual Operational Capacity (DROC) — c'est-à-dire la capacité réellement mobilisable après prise en compte de l'état technique, de l'exploitation, de la maintenance, de l'énergie, des ressources, des engagements déjà consommant la capacité et de l'incertitude prévisionnelle. Le cadre proposé est fédéré : chaque opérateur conserve son autorité et ses systèmes critiques mais expose une représentation limitée, normalisée et auditable de sa capacité actuelle et de sa capacité prévisionnelle, chacune associée à un horizon, un niveau d'incertitude et une règle de prudence lorsque nécessaire. La contribution est formulée comme une hypothèse de recherche, non comme une supériorité démontrée. Un programme de validation S0–S3 est proposé pour comparer routage individuel, System Optimum à capacité nominale, capacité opérationnelle dynamique et orchestration DROC robuste.	Navigation systems and MaaS platforms increasingly optimize individual routes, yet locally rational recommendations can generate system-wide congestion when applied simultaneously at scale. This paper proposes shifting the central variable of multimodal optimization toward Dynamic Residual Operational Capacity (DROC): the capacity that can actually be mobilized after accounting for technical state, operations, maintenance, energy, resources, existing commitments consuming capacity, and forecast uncertainty. The proposed framework is federated: each operator retains authority and control of critical systems while exposing a limited, normalized and auditable representation of present capacity and forecast capacity, with the latter explicitly associated with a time horizon, uncertainty level, and prudence rule where required. The contribution is framed as a research hypothesis rather than a demonstrated performance claim. An S0–S3 validation program is proposed to compare individual routing, System Optimum using nominal capacity, dynamic operational capacity, and robust DROC-based orchestration.

Mots-clés / Keywords: DROC; multimodal mobility; System Optimum; User Equilibrium; operational capacity; maintenance; energy; digital twin; federated orchestration; resilience; system of systems.

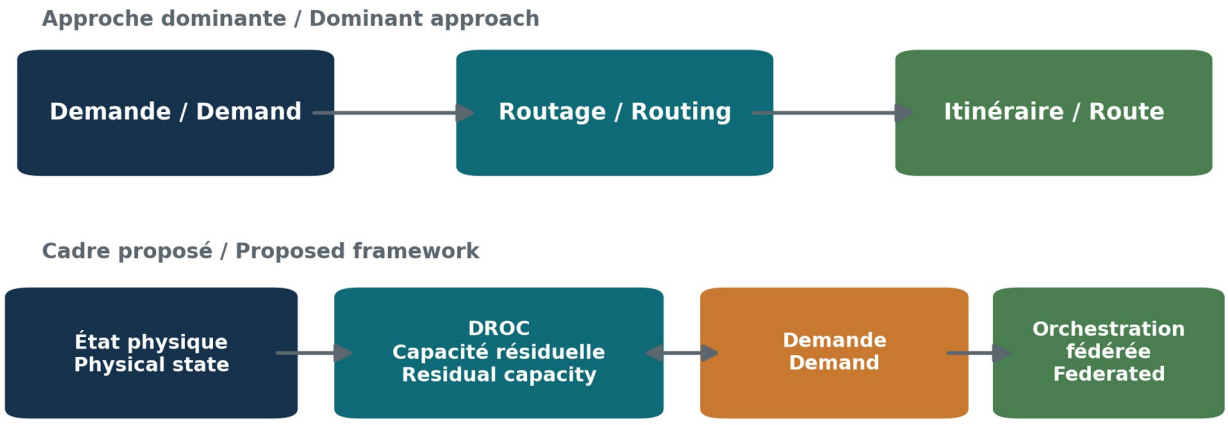


Figure 1 — Changement de variable centrale / Shift in the central optimization variable.

Positionnement scientifique / Scientific positioning

Ce document est volontairement positionné comme un article conceptuel et un agenda de recherche. Il ne revendique pas l'invention du MaaS, du System Optimum, des Digital Twins, de l'optimisation multimodale ou des espaces de données fédérés. Le présent article propose et formalise la Dynamic Residual Operational Capacity (DROC) comme hypothèse de recherche : une interface normalisée entre l'état cyber-physique des réseaux et une orchestration multimodale fédérée. La nouveauté et les performances de cette proposition restent à tester par revue systématique et validation comparative.

This document is deliberately positioned as a conceptual paper and research agenda. It does not claim to invent MaaS, System Optimum, digital twins, multimodal optimization, or federated data spaces. This paper proposes and formalizes Dynamic Residual Operational Capacity (DROC) as a research hypothesis: a normalized interface between the cyber-physical state of transport networks and federated multimodal orchestration. The novelty and performance of this proposal remain to be tested through systematic review and comparative validation.

Hypothèse de gap / Gap hypothesis

La littérature préliminaire montre que plusieurs de ces domaines disposent déjà de travaux avancés, mais selon des niveaux de maturité et de validation différents : MM-DTA, optimisation système, jumeaux numériques, maintenance, énergie, interopérabilité et espaces de données. La question non encore démontrée est de savoir si un cadre multimodal fédéré place déjà une capacité résiduelle, prévisionnelle et incertaine — dérivée explicitement de l'exploitation, des actifs, de la maintenance, des ressources et de l'énergie — au centre de l'orchestration. Cette question doit être résolue par une revue systématique avant toute revendication formelle de nouveauté.

Preliminary literature shows that several of these fields already contain advanced work, although at different levels of maturity and validation: MM-DTA, system optimization, digital twins, maintenance, energy, interoperability, and federated data spaces. What remains to be demonstrated is whether an existing multimodal federated framework already places residual, forecast, and uncertain operational capacity — explicitly derived from operations, assets, maintenance, resources, and energy — at the center of orchestration. This question must be resolved through a systematic review before any formal novelty claim.

PARTIE I — VERSION FRANÇAISE

1. Problématique : de l'itinéraire individuel au système physique

La numérisation de la mobilité a fortement amélioré la capacité à calculer des itinéraires dynamiques. Les travaux en affectation dynamique multimodale (MM-DTA) cherchent à représenter plusieurs modes, des demandes variables dans le temps et des interactions de réseau de plus en plus réalistes. Une revue récente souligne encore des enjeux de passage à l'échelle, de demande temporellement variable, de données temps réel et de réduction du fossé simulation–réalité [4].

La difficulté apparaît lorsqu'une recommandation individuellement rationnelle est appliquée simultanément à grande échelle. Une interruption ferroviaire peut conduire des milliers de voyageurs vers une même alternative et transférer la saturation vers un métro, un pôle d'échanges, un quai ou un corridor routier. Ce phénomène renvoie aux principes historiques de Wardrop : User Equilibrium (UE) et System Optimum (SO) [1–3].

> **Question de recherche : comment coordonner la demande de mobilité avec ce que les systèmes physiques peuvent réellement absorber, au moment où la demande réorientée les atteindra ?**

2. Fondations scientifiques : User Equilibrium, System Optimum et MM-DTA

Dans un User Equilibrium, les usagers choisissent leurs itinéraires en minimisant leur coût individuel compte tenu de l'état du réseau. Dans un System Optimum, la fonction objectif porte sur le coût total du système. Ces deux états ne coïncident pas nécessairement [1–3]. Les développements MM-DTA contemporains étendent cette logique aux systèmes multimodaux et dynamiques, y compris via des méthodes multi-agents et d'apprentissage par renforcement [4,5].

Le cadre DROC ne cherche pas à remplacer cette théorie. Il ajoute une couche de réalisme cyber-physique : même une affectation mathématiquement optimale devient inutilisable si la capacité supposée par le modèle n'est pas physiquement mobilisable.

3. Définir la capacité : nominale, technique, opérationnelle, résiduelle

Le terme capacité doit être décomposé. Le règlement d'exécution (UE) 2017/2177 reconnaît d'ailleurs, dans le contexte des installations de service ferroviaires, que la capacité opérationnelle maximale peut être inférieure à la capacité théorique maximale afin de préserver la fiabilité lors de retards ou perturbations [10]. Cette distinction réglementaire ne définit pas DROC mais illustre la nécessité de séparer capacité théorique et capacité réellement exploitable.

$$C_r^{nom} \geq C_r^{tech}(t) \geq C_r^{op}(t) \geq C_r^{res}(t)$$

Équation (1) — Hiérarchie conceptuelle des capacités. Formulation conceptuelle ; non calibrée sur des données réelles.

- Capacité nominale C_nom : capacité de référence ou de conception.
- Capacité technique C_tech(t) : capacité compatible avec l'état instantané des actifs.
- Capacité opérationnelle C_op(t) : capacité exploitable compte tenu des règles, ressources, maintenance, énergie et marges de robustesse.
- Capacité résiduelle C_res(t) : part encore mobilisable après prise en compte des engagements présents et prévisionnels consommant ou réservant la ressource.

La variable D_r(t) ne doit pas être réduite au nombre de voyageurs observés. Elle représente l'ensemble des engagements qui consomment ou réservent la capacité : flux déjà engagés, sillons, mouvements planifiés, marges de régularité protégées, réserves opérationnelles, correspondances à forte probabilité d'arrivée et priorités de sécurité ou d'évacuation.

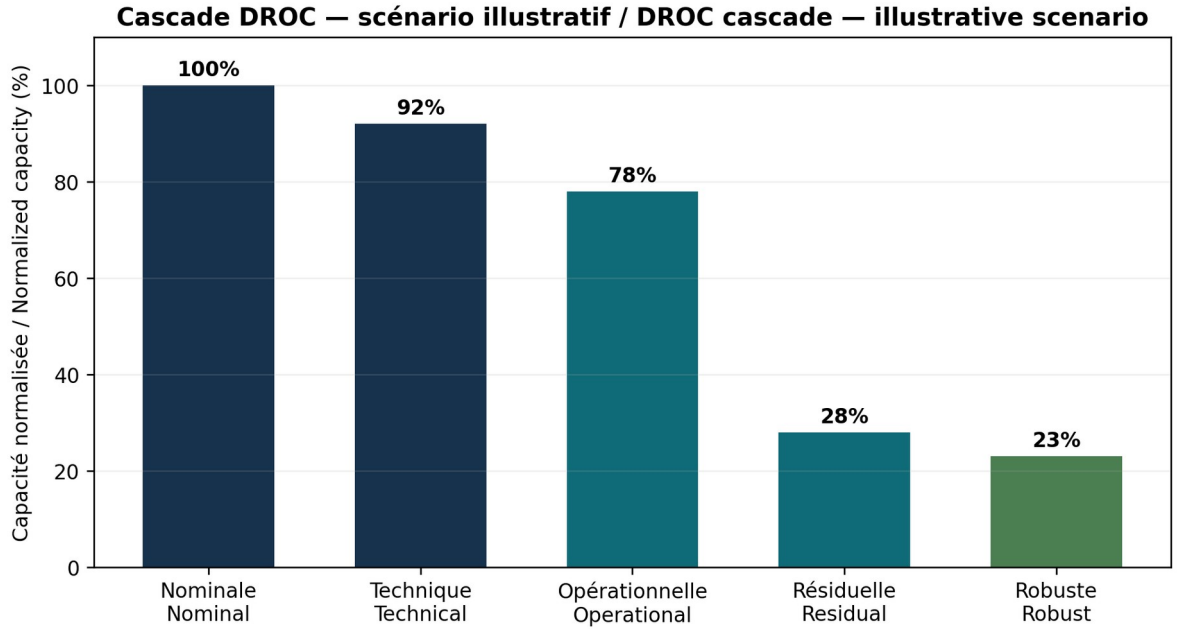


Figure 2 — Cascade DROC normalisée. Les valeurs sont illustratives et ne constituent pas des résultats expérimentaux.

4. Formalisation de la Dynamic Residual Operational Capacity — DROC

Pour une ressource r, la capacité opérationnelle est représentée par une fonction propre au sous-système. Une simple multiplication de coefficients serait insuffisante : certaines contraintes réduisent progressivement la capacité, tandis que d'autres annulent entièrement la disponibilité.

$$C_r^{op}(t) = \Phi_r\left(C_r^{nom}, A_r(t), M_r(t), E_r(t), S_r(t), R_r(t), I_r(t)\right)$$

Équation (2) — Capacité opérationnelle comme fonction de l'état du système. Formulation conceptuelle ; non calibrée sur des données réelles.

- A_r(t) : disponibilité des actifs ; M_r(t) : contraintes et état de maintenance ;
- E_r(t) : puissance, énergie, recharge ou alimentation traction ; S_r(t) : ressources humaines ;
- R_r(t) : règles et restrictions d'exploitation ; I_r(t) : incidents et perturbations.

$$C_r^{res}(t) = \Psi_r\left(C_r^{op}(t), D_r(t)\right)$$

Équation (3) — Capacité résiduelle après prise en compte des engagements D_r(t). Formulation conceptuelle ; non calibrée sur des données réelles.

L'orchestration doit ensuite raisonner sur l'horizon d'arrivée du flux réorienté et non sur le seul instant t.

$$\widehat{C}_r^{res}(t + \Delta t), \quad U_r(t + \Delta t)$$

Équation (4) — Capacité résiduelle prévisionnelle et incertitude associée. Formulation conceptuelle ; non calibrée sur des données réelles.

L'incertitude U_r peut représenter la variabilité de la demande, la durée incertaine d'un incident, une reprise de service non garantie, la qualité des données ou l'incertitude d'un modèle de prévision.

$$C_r^{rob}(t+\Delta t) = \max\left(0, \widehat{C}_r^{res}(t+\Delta t) - \lambda U_r(t+\Delta t)\right)$$

Équation (5) — Capacité robuste, bornée à zéro afin d'éviter toute capacité physiquement négative. Formulation conceptuelle ; non calibrée sur des données réelles.

5. La capacité est multidimensionnelle et liée aux ressources critiques

Une ligne de métro ne possède pas une capacité unique. Le service peut être limité par les trains, les quais, les couloirs, les correspondances, le retournement, l'évacuation, la signalisation ou l'énergie. Envoyer davantage de voyageurs vers une ligne dont les trains disposent encore de places peut rester impossible si la station d'échange est saturée.

$$C_{path}^{res}(t) = \min_{r \in path} C_r^{res}(t)$$

Équation (6) — Approximation conservatrice de la capacité d'un chemin par sa ressource critique. Formulation conceptuelle ; non calibrée sur des données réelles.

Cette relation constitue une approximation conservatrice. Dans un modèle multimodal complet, la capacité du chemin dépend également de la synchronisation temporelle, des correspondances, des temps d'accès et des interdépendances entre ressources. Dans un réseau réel, le goulot peut évoluer dans le temps et un même actif peut appartenir à plusieurs chemins concurrents. Pour les ressources qui ne transportent pas directement des voyageurs — par exemple une sous-station, une équipe, un dépôt ou une ressource énergétique — la capacité doit être convertie en contrainte équivalente de flux voyageurs par le modèle opérationnel du sous-système.

6. Architecture proposée : orchestration opérationnelle fédérée

Une métropole est un System of Systems : ferroviaire, métro, bus, route, micromobilité, énergie et maintenance restent exploités par des organisations distinctes. Les travaux sur l'interopérabilité des Systems of Systems montrent que les difficultés ne sont pas uniquement techniques mais aussi sémantiques, organisationnelles et de gouvernance [9].

L'architecture DROC ne centralise donc pas le contrôle. Chaque opérateur conserve ses OCC/PCC/TMS/SCADA/SAE/GMAO et son autorité de sûreté. La couche fédérée reçoit seulement les objets de capacité nécessaires à la coordination. Cette logique est cohérente avec les travaux FP1-MOTIONAL d'Europe's Rail sur la mobilité multimodale, la prévision de la demande, les Digital Twins et les Federated Data Spaces [11,12], ainsi qu'avec le white paper du Digital Twin Consortium sur des jumeaux interopérables distribués [13]. Ces travaux montrent que certains composants d'une architecture fédérée sont en cours de développement et de démonstration ; ils ne démontrent pas, à eux seuls, l'existence d'une orchestration multimodale DROC complète.

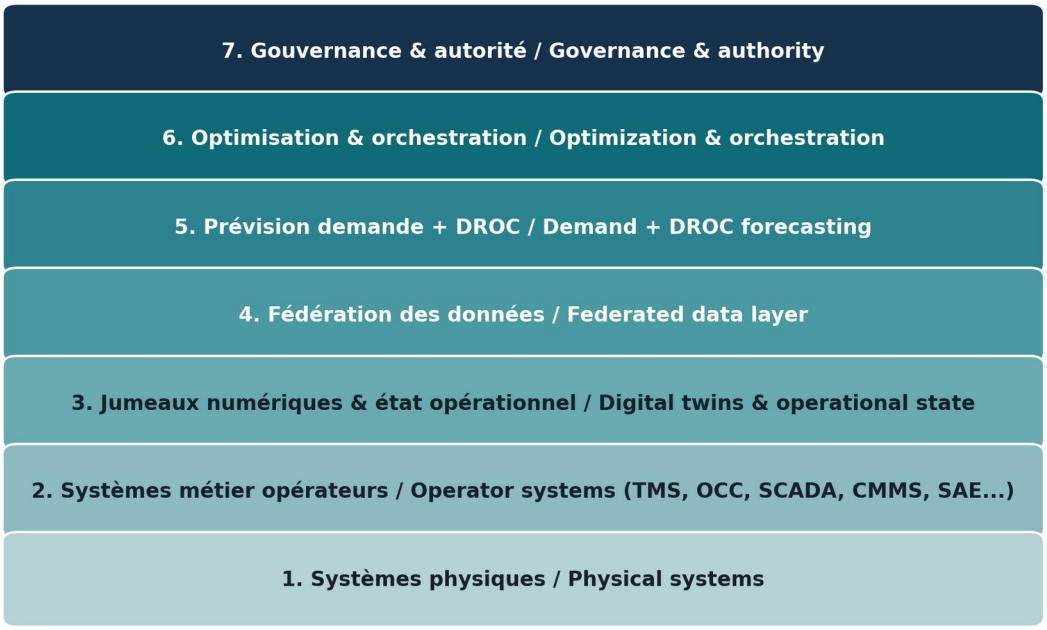


Figure 3 — Architecture fonctionnelle à sept couches. La fédération porte sur l'information de capacité, pas sur le transfert de l'autorité de contrôle.

Un objet partagé pourrait exposer : identifiant de ressource, capacité nominale, capacité opérationnelle, engagements, DROC actuelle, prévision DROC à plusieurs horizons, niveau de confiance, restriction dominante et horodatage. Les données détaillées de maintenance ou de sécurité peuvent rester internes si l'orchestrateur n'en a pas besoin.

7. Optimisation : objectifs pondérés et contraintes non compensables

L'optimisation peut traiter certains critères comme des compromis : temps, congestion, énergie, coûts, résilience, externalités environnementales et équité. En revanche, les règles de sécurité, les limites physiques d'énergie, les contraintes d'exploitation et les autorisations de gouvernance ne doivent pas être compensées par une amélioration de la fonction objectif.

$$J(x) = w_T T + w_G G + w_E E + w_O O + w_R R + w_H H + w_Q Q$$

Équation (7) — Exemple de fonction objectif multi-critères. H désigne les externalités environnementales afin de réserver C à la capacité. Formulation conceptuelle ; non calibrée sur des données réelles.

$$\min_x J(x) \quad \text{s. t.} \quad Flow_r(t) \le C_r^{rob}(t)\ \forall r \in R,\ x \in F_{safe} \cap F_{operational} \cap F_{energy} \cap F_{governance}$$

Équation (8) — Ensemble de contraintes dures : capacité robuste, sûreté, exploitation, énergie et gouvernance. Formulation conceptuelle ; non calibrée sur des données réelles.

- F_safe : sécurité, évacuation, signalisation et règles non négociables ;
- F_operational : horaires, roulements, terminus, personnel et règles d'exploitation ;

- F_energy : puissance, énergie, recharge et alimentation traction ;
- F_governance : permissions, responsabilités, qualité et disponibilité des données.

8. Décision et autorité : observer, prévoir, recommander, coordonner

Le cadre distingue la capacité de calcul d'une recommandation de l'autorité d'exécuter une décision. Les horizons sont différents : une recommandation voyageurs peut être recalculée en secondes ; une régulation de métro relève du centre de contrôle ; un renforcement bus exige l'opérateur ; un report de maintenance requiert l'autorité maintenance ; une modification structurelle de l'offre relève de l'autorité organisatrice.

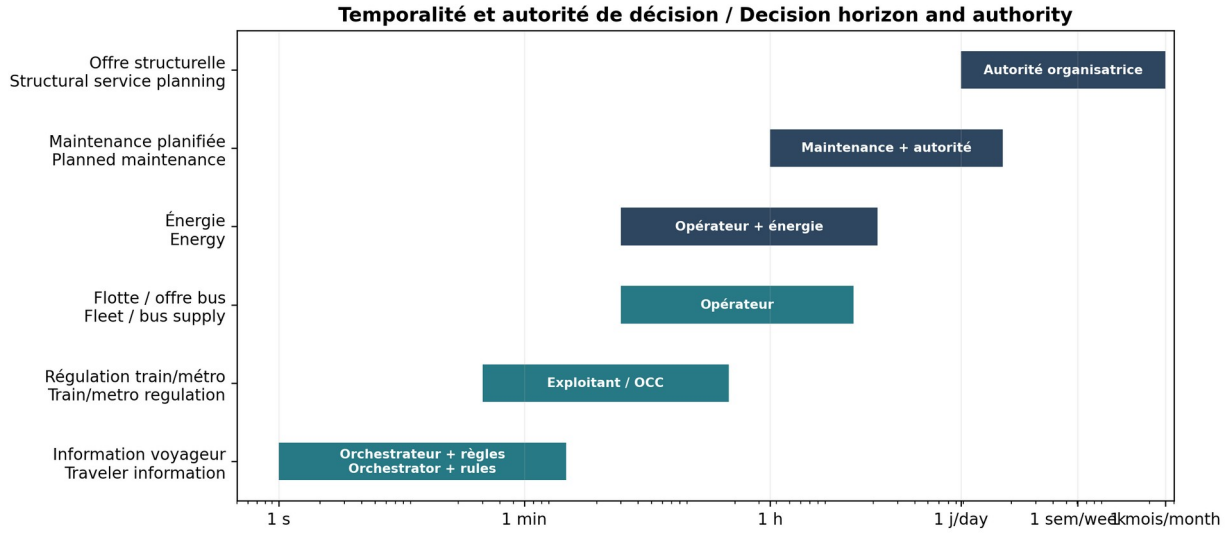


Figure 4 — Horizons indicatifs de décision et autorités responsables. Le diagramme illustre une séparation des responsabilités, non une norme universelle.

Principe de sûreté : Observe → Predict → Recommend → Coordinate ne signifie jamais que l'orchestrateur se substitue à Authorize → Execute pour les fonctions critiques.

9. Maintenance et énergie : variables de mobilité, pas seulement fonctions support

La maintenance modifie directement la capacité disponible. Les travaux sur la planification des projets de maintenance ferroviaire montrent l'interaction entre fenêtres de travaux, capacité et retards voyageurs [7]. Dans DROC, la donnée maintenance sert donc à estimer ce que le système pourra réellement offrir dans l'horizon de décision, et pas seulement à décider quand maintenir un actif.

L'énergie suit la même logique. Ajouter une rame, un train ou une flotte de véhicules électriques peut être impossible si la puissance traction, la recharge ou la réserve énergétique ne le permet pas. TransitMo associe déjà Digital Twin, préférences utilisateurs, modèle énergétique et System Optimization ; il démontre que l'énergie peut être intégrée dans la décision multimodale [6]. DROC généralise cette contrainte en la ramenant à la capacité mobilisable de chaque ressource.

10. Cas d'usage illustratif : interruption ferroviaire majeure

Considérons 100 000 voyageurs affectés par une interruption. Un moteur d'itinéraire peut produire une forte demande vers Metro-A. Si sa capacité nominale est élevée mais que la DROC n'est plus que de 5 000 voyageurs/h, orienter 30 000 voyageurs supplémentaires est physiquement incohérent. L'orchestrateur doit alors combiner plusieurs alternatives, étaler les flux et protéger les nœuds critiques.

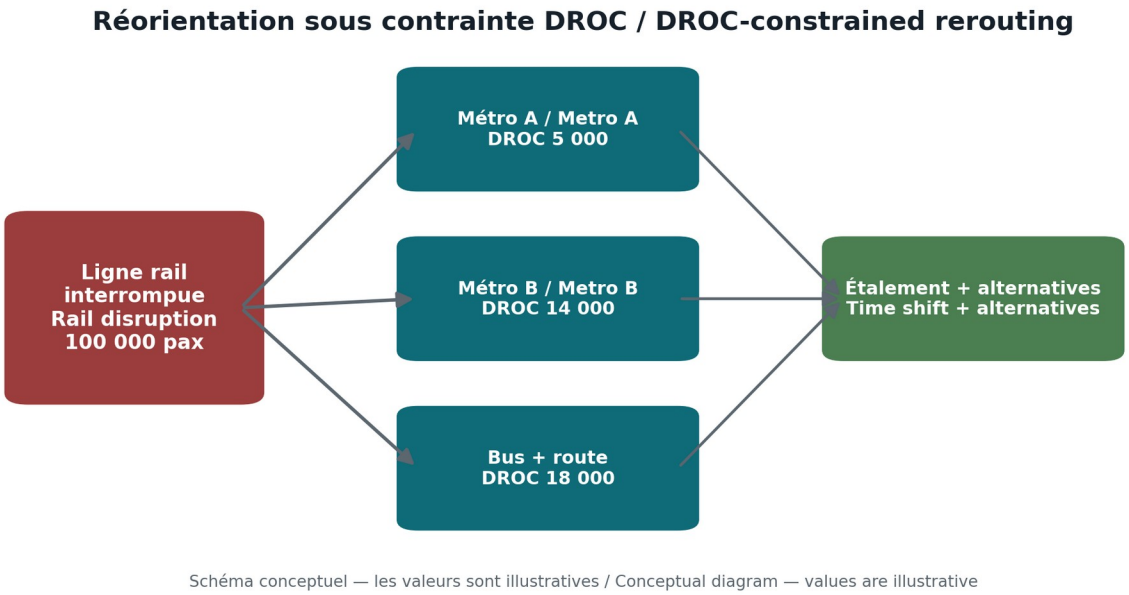


Figure 5 — Réorientation multimodale sous contrainte DROC. Valeurs illustratives uniquement.

La question n'est plus « quel chemin existe ? », mais « quelle combinaison de flux peut être absorbée par le système physique au moment où les voyageurs atteindront chaque ressource ? »

11. Résilience, robustesse et incertitude

Le temps réel n'est pas synonyme de certitude. Une capacité future est toujours associée à un horizon Δt, à une incertitude et à une règle de prudence. Elle repose sur des prévisions de propagation de congestion, de durée d'incident, de disponibilité du matériel roulant, de disponibilité du personnel, d'achèvement effectif d'une maintenance et d'état énergétique. La capacité robuste de l'équation (5) réduit la capacité utilisable lorsque l'incertitude augmente. Le coefficient λ représente alors un niveau de prudence défini par la politique d'exploitation et la criticité du contexte.

Cette approche ouvre la voie à l'optimisation robuste ou stochastique. Une future validation devra comparer plusieurs politiques de λ et mesurer le compromis entre sous-utilisation de capacité et risque de saturation.

12. Sûreté, cybersécurité et auditabilité

- L'orchestration ne transfère jamais la responsabilité de sûreté de l'exploitant.
- Aucun calcul d'optimum ne peut contourner les enclenchements, limitations de sécurité ou règles d'évacuation.
- Les données partagées doivent être minimisées, horodatées, authentifiées et tracées.
- Les recommandations doivent être explicables et reconstructibles a posteriori.
- Une politique de repli doit couvrir perte de communication, données contradictoires, obsolescence des informations, confiance insuffisante et cyberattaque.
- La défaillance de la fédération ne doit jamais empêcher un opérateur de continuer à exploiter son propre système en sécurité.

13. Équité et fonction de politique publique

Le System Optimum peut demander à certains usagers d'accepter un trajet moins favorable pour réduire la congestion globale. Ce problème n'est pas uniquement mathématique : il concerne l'équité, le consentement, l'accessibilité, la tarification et la légitimité de la fonction objectif. Les poids w_i ne doivent donc pas être « appris » sans gouvernance ; ils reflètent des choix de politique de transport.

Une validation scientifique devra mesurer la distribution des détours, et non seulement leur moyenne : le cadre ne doit pas améliorer le système au prix d'une concentration durable des pénalités sur les mêmes zones ou catégories d'usagers.

14. Hypothèses de recherche et protocole de validation

1. H1 — Une capacité résiduelle dynamique représente plus fidèlement la capacité mobilisable qu'une capacité nominale ou statique.
2. H2 — Une orchestration fondée sur DROC réduit la propagation de congestion pendant une perturbation multimodale.
3. H3 — L'intégration de la maintenance modifie certaines décisions d'affectation ou de renforcement.
4. H4 — L'intégration de l'énergie modifie certaines décisions d'offre ou de réallocation.
5. H5 — Une DROC prévisionnelle réduit les réorientations vers des ressources qui seront saturées au moment d'arrivée.
6. H6 — Une architecture fédérée peut obtenir une amélioration systémique sans centralisation complète des données et du contrôle.
7. H7 — L'incertitude explicite améliore la robustesse des décisions par rapport à une capacité prévisionnelle déterministe.

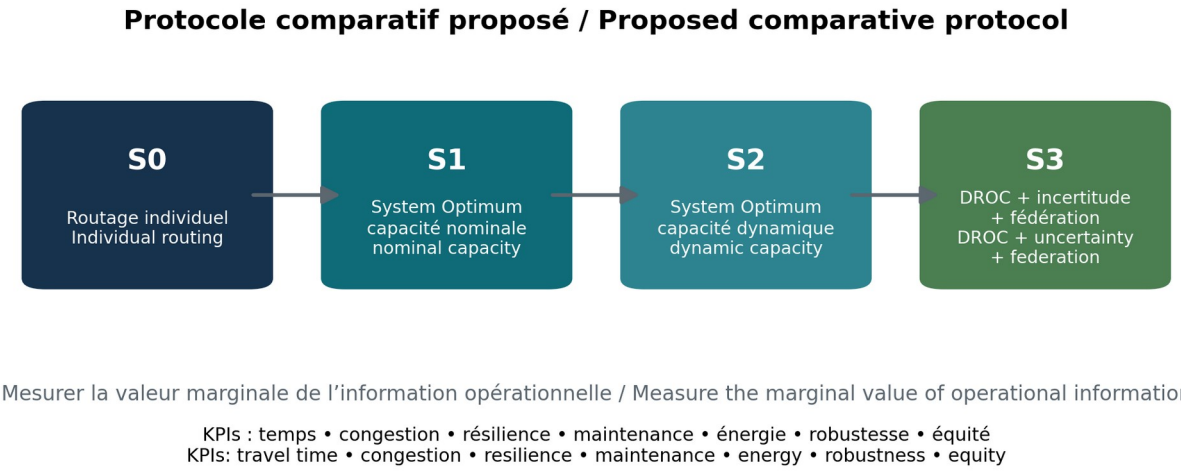


Figure 6 — Programme de validation proposé S0–S3. Aucun résultat S3 n'est revendiqué à ce stade.

Les indicateurs proposés couvrent : temps moyen et P95, congestion maximale, capacité résiduelle, propagation de la perturbation, temps de récupération, sollicitations d'actifs dégradés, puissance de pointe, énergie, violations de contraintes, sensibilité aux erreurs de prévision et équité des détours.

15. Gap scientifique, contribution et limites

La littérature préliminaire confirme que plusieurs domaines associés à DROC disposent déjà de travaux avancés, selon des niveaux de maturité et de validation différents : MM-DTA [4,5], Digital Twins et System Optimization [6,8], maintenance ferroviaire [7], interopérabilité System of Systems [9], espaces de données fédérés et mobilité multimodale ferroviaire [11,12], jumeaux interopérables [13]. La contribution ne doit donc pas être présentée comme l'invention de ces éléments.

> **Contribution proposée à tester : formaliser la Dynamic Residual Operational Capacity (DROC) comme interface commune entre l'état cyber-physique des réseaux et les mécanismes d'orchestration multimodale fédérée, en intégrant explicitement capacité résiduelle, horizon prévisionnel, incertitude et contraintes opérationnelles non compensables.**

Cette contribution reste une hypothèse de gap. Une revue systématique PRISMA ou équivalente doit coder au minimum : multimodalité, UE/SO, capacité dynamique, capacité résiduelle, prévision, infrastructure, matériel, personnel, maintenance, énergie, perturbations, Digital Twin, incertitude, temps réel, fédération, gouvernance, équité et validation réelle.

Les limites actuelles sont substantielles : qualité des données, standardisation intermodale, confidentialité, cybersécurité, gouvernance, responsabilité, acceptabilité sociale, complexité computationnelle et absence de

démonstration empirique. DROC doit donc être considéré comme un programme de recherche, non comme une solution déjà prouvée.

16. Conclusion

La mobilité numérique ne doit pas seulement répondre à la question « quel est le meilleur itinéraire ? ». Dans un système multimodal perturbé, elle doit aussi connaître ce que les infrastructures, les actifs, les équipes et l'énergie peuvent réellement offrir au moment où les flux arriveront.

DROC propose une chaîne de raisonnement : capacité nominale → capacité technique → capacité opérationnelle → capacité résiduelle → capacité robuste prévisionnelle. Cette variable devient alors un langage commun potentiel entre les systèmes physiques et une orchestration fédérée.

> **La mobilité n'est pas seulement un graphe de déplacements. C'est une capacité industrielle dynamique à mettre en correspondance avec une demande dynamique.**

PART II — ENGLISH VERSION

1. Research problem: from individual routes to the physical system

Digital mobility has significantly improved dynamic route calculation. Multimodal Dynamic Traffic Assignment (MM-DTA) research seeks to represent multiple modes, time-varying demand, and increasingly realistic network interactions. A recent survey still identifies scalability, time-varying demand, real-time information, and the simulation-to-reality gap as key research challenges [4].

The difficulty appears when individually rational recommendations are applied simultaneously at scale. A rail disruption may redirect thousands of passengers toward the same alternative, transferring saturation to a metro line, interchange, platform, or road corridor. This tension traces back to Wardrop's principles of User Equilibrium (UE) and System Optimum (SO) [1–3].

> **Research question: how can mobility demand be coordinated with what physical transport systems can actually absorb when redirected demand reaches them?**

2. Scientific foundations: User Equilibrium, System Optimum and MM-DTA

Under User Equilibrium, travelers select routes that minimize their own generalized cost given network conditions. Under System Optimum, the objective is defined at the level of total system cost. These states do not necessarily coincide [1–3]. Contemporary MM-DTA research extends this logic to dynamic and multimodal systems, including multi-agent and reinforcement-learning approaches [4,5].

DROC does not replace this theoretical foundation. It adds a cyber-physical realism layer: even a mathematically optimal assignment becomes infeasible if the capacity assumed by the model cannot actually be mobilized.

3. Defining capacity: nominal, technical, operational and residual

Capacity must be decomposed. Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2177 explicitly recognizes, for rail service facilities, that maximum operational capacity may be lower than maximum theoretical capacity in order to preserve reliable operations during delays or disruptions [10]. This regulatory example does not define DROC, but it illustrates why theoretical and usable capacity must be separated.

$$C_r^{nom} \geq C_r^{tech}(t) \geq C_r^{op}(t) \geq C_r^{res}(t)$$

Equation (1) — Conceptual hierarchy of capacity states. Conceptual formulation; not calibrated on real-world data.

- Nominal capacity C_nom: reference or design capacity.
- Technical capacity C_tech(t): capacity compatible with the instantaneous technical state of assets.
- Operational capacity C_op(t): usable capacity after operating rules, resources, maintenance, energy, and robustness margins are considered.
- Residual capacity C_res(t): the portion still mobilizable after present and forecast commitments consuming or reserving the resource are considered.

D_r(t) must not be interpreted solely as observed passenger load. It represents all commitments that consume or reserve capacity: committed passenger flows, train paths, planned movements, protected reliability margins, operating reserves, high-probability transfer flows, and safety or evacuation priorities.

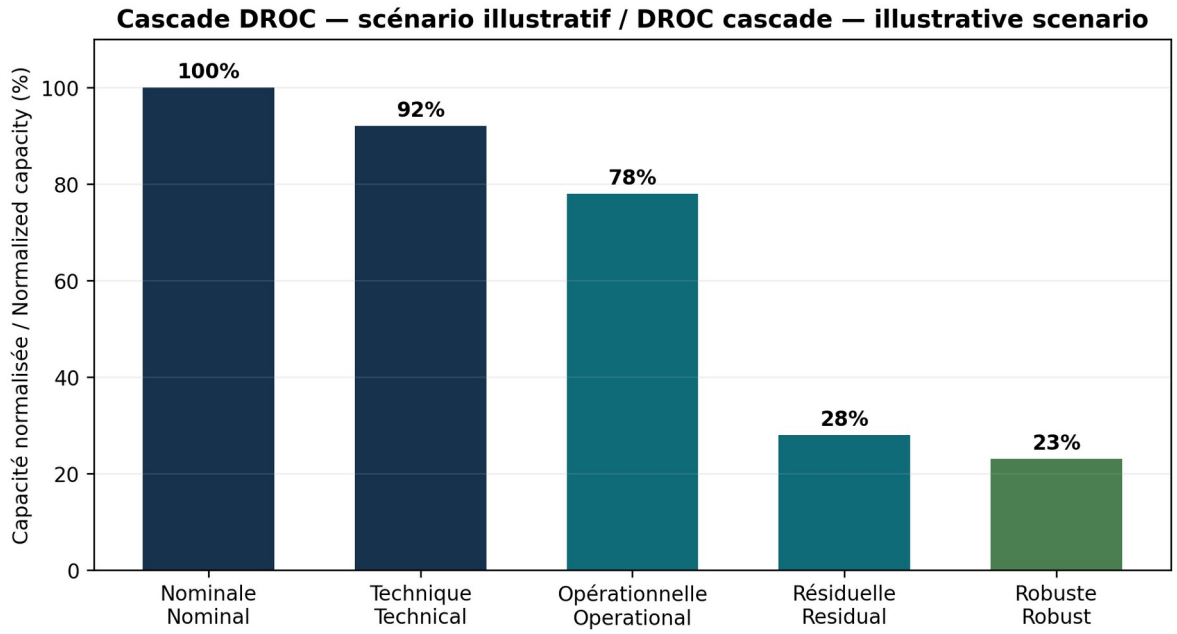


Figure 2 — Normalized DROC cascade. Values are illustrative and do not represent experimental results.

4. Formalizing Dynamic Residual Operational Capacity — DROC

For each resource r, operational capacity is represented by a subsystem-specific function. A simple multiplicative degradation model would be insufficient: some constraints gradually reduce capacity while others render a resource unavailable.

$$C_r^{op}(t) = \Phi_r\left(C_r^{nom}, A_r(t), M_r(t), E_r(t), S_r(t), R_r(t), I_r(t)\right)$$

Equation (2) — Operational capacity as a function of system state. Conceptual formulation; not calibrated on real-world data.

- A_r(t): asset availability; M_r(t): maintenance state and constraints;
- E_r(t): traction power, energy, charging, or supply constraints; S_r(t): staff resources;
- R_r(t): operating rules and restrictions; I_r(t): incidents and disruptions.

$$C_r^{res}(t) = \Psi_r\left(C_r^{op}(t), D_r(t)\right)$$

Equation (3) — Residual capacity after commitments D_r(t) are considered. Conceptual formulation; not calibrated on real-world data.

Orchestration must then reason over the arrival horizon of redirected flows rather than only at the current instant.

$$\widehat{C}_r^{res}(t + \Delta t), \quad U_r(t + \Delta t)$$

Equation (4) — Forecast residual capacity and associated uncertainty. Conceptual formulation; not calibrated on real-world data.

U_r may represent demand variability, uncertain incident duration, uncertain restoration, data quality, or forecast-model uncertainty.

$$C_r^{rob}(t+\Delta t) = \max\left(0, \widehat{C}_r^{res}(t+\Delta t) - \lambda U_r(t+\Delta t)\right)$$

Equation (5) — Robust capacity bounded at zero to prevent physically meaningless negative capacity. Conceptual formulation; not calibrated on real-world data.

5. Capacity is multidimensional and constrained by critical resources

A metro line does not have a single capacity. Service may be constrained by trains, platforms, circulation areas, transfer facilities, turn-back capacity, evacuation, signaling, or energy. Redirecting passengers to a line with room onboard may still be infeasible when the interchange station is saturated.

$$C_{path}^{res}(t) = \min_{r \in path} C_r^{res}(t)$$

Equation (6) — Conservative approximation of path capacity through its critical resource. Conceptual formulation; not calibrated on real-world data.

This relation is a conservative approximation. In a complete multimodal model, path capacity also depends on temporal synchronization, transfers, access times, and interdependencies among resources. In real networks, bottlenecks shift over time and the same resource may support several competing paths. For non-passenger resources — such as a substation, staff resource, depot, or energy asset — the capacity representation must be translated into an equivalent passenger-flow constraint through the operational model of the subsystem.

6. Proposed architecture: federated operational orchestration

A metropolitan mobility ecosystem is a System of Systems: rail, metro, bus, road, shared mobility, energy, and maintenance are typically managed by distinct organizations. Research on heterogeneous Systems of Systems shows that interoperability challenges are technical, semantic, organizational, and governance-related [9].

The DROC architecture therefore does not centralize control. Each operator retains OCC/PCC/TMS/SCADA/AVL/CMMS systems and safety authority. The federated layer receives only the capacity objects needed for coordination. This logic is consistent with Europe's Rail FP1-MOTIONAL work on multimodal mobility, demand anticipation, digital twins, and Federated Data Spaces [11,12], and with the Digital Twin Consortium's distributed system-of-systems blueprint [13]. These initiatives show that components of a federated architecture are being developed and demonstrated; they do not, by themselves, demonstrate a complete DROC-based multimodal orchestration system.

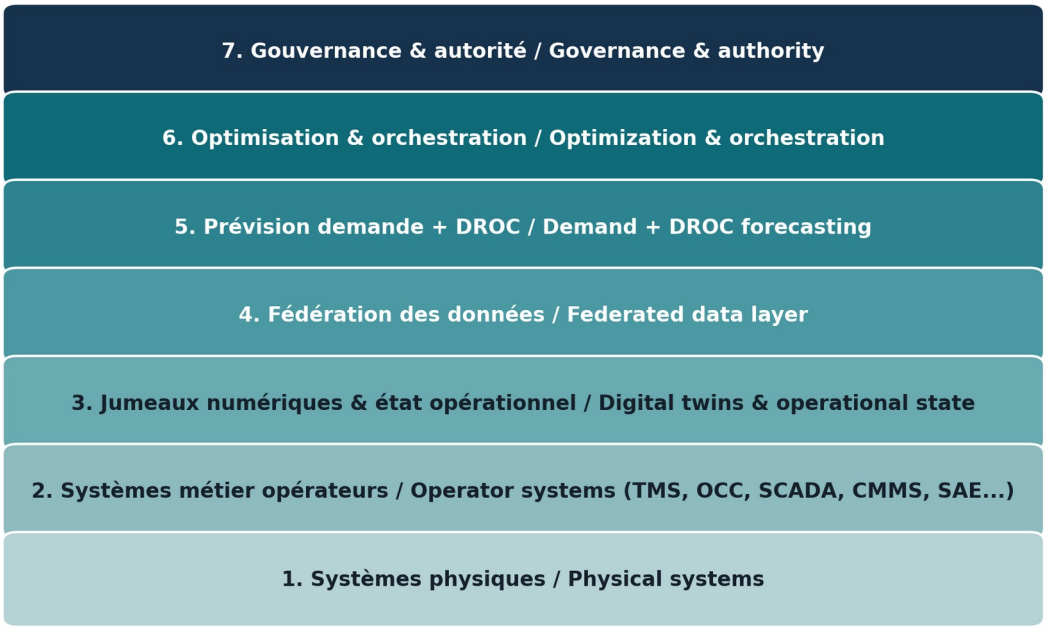


Figure 3 — Seven-layer functional architecture. Federation concerns capacity information, not transfer of control authority.

A shared object could expose: resource identifier, nominal capacity, operational capacity, commitments, current DROC, forecast DROC at multiple horizons, confidence level, dominant restriction, and timestamp. Detailed maintenance or safety data may remain internal when the orchestrator does not need them.

7. Optimization: weighted objectives and non-compensable constraints

Some criteria can be treated as trade-offs: travel time, congestion, energy, operating costs, resilience, environmental externalities, and equity. Safety rules, physical energy limits, operational constraints, and governance permissions, however, must not be compensated by improvements in the objective function.

$$J(x) = w_T T + w_G G + w_E E + w_O O + w_R R + w_H H + w_Q Q$$

Equation (7) — Illustrative multi-criteria objective function. H denotes environmental externalities so that C remains reserved for capacity. Conceptual formulation; not calibrated on real-world data.

$$\min_x J(x) \quad \text{s.t.} \quad Flow_r(t) \le C_r^{rob}(t)\ \forall r \in R,\ x \in F_{safe} \cap F_{operational} \cap F_{energy} \cap F_{governance}$$

Equation (8) — Hard constraint set: robust capacity, safety, operations, energy, and governance. Conceptual formulation; not calibrated on real-world data.

- F_safe: safety, evacuation, signaling, and non-negotiable rules;
- F_operational: timetables, crew diagrams, turn-back limits, staff, and operating rules;
- F_energy: power, energy, charging, and traction supply;
- F_governance: permissions, responsibilities, data quality, and data availability.

8. Decision authority: observe, predict, recommend, coordinate

The framework separates computational recommendation from the authority to execute operational decisions. Horizons differ: passenger recommendations may change within seconds; metro regulation belongs to the control center; bus reinforcement requires the operator; maintenance rescheduling requires maintenance authority; structural service changes fall under the responsibility of the transport authority.

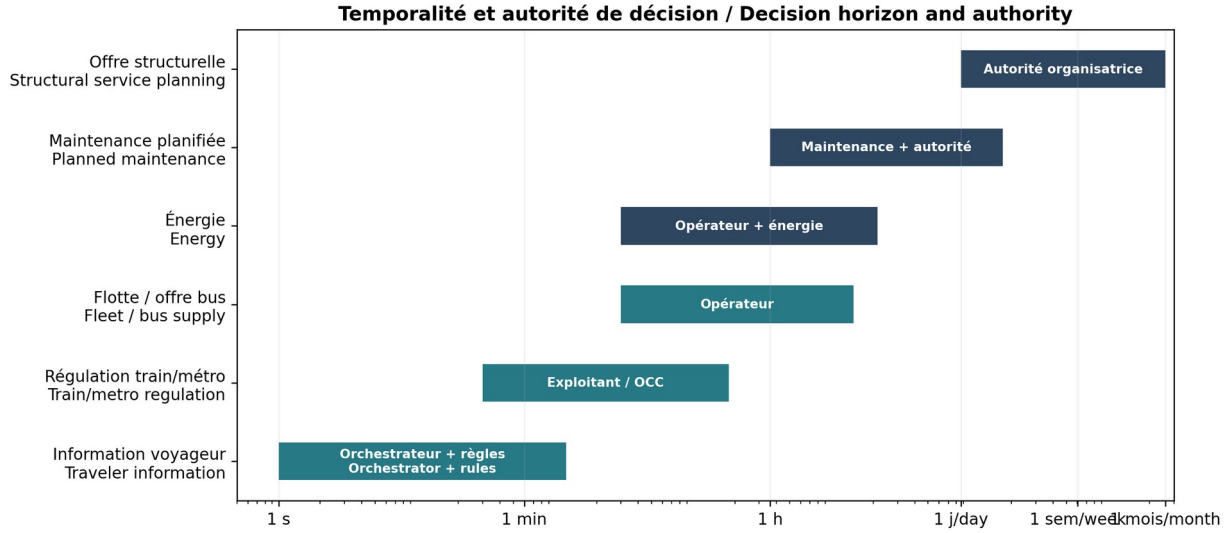


Figure 4 — Indicative decision horizons and responsible authorities. The diagram illustrates separation of responsibilities, not a universal standard.

> **Safety principle: Observe → Predict → Recommend → Coordinate never means that the orchestrator replaces Authorize → Execute for critical functions.**

9. Maintenance and energy: mobility variables, not only support functions

Maintenance directly changes available capacity. Research on railway maintenance scheduling explicitly shows the interaction between maintenance windows, railway capacity, and passenger delay [7]. Within DROC, maintenance data therefore help estimate what the system will actually be able to provide during the decision horizon, not only when an asset should be maintained.

Energy follows the same logic. Adding a train, vehicle, or electric fleet may be impossible if traction power, charging infrastructure, or energy reserve is insufficient. TransitMo already couples a transportation digital twin, user preferences, an energy model, and System Optimization [6]. DROC generalizes the constraint by translating it into the mobilizable capacity of each resource.

10. Illustrative use case: major rail disruption

Consider 100,000 passengers affected by a disruption. An individual route engine may create strong demand for Metro-A. If its nominal capacity is high but its DROC is only 5,000 passengers per hour, redirecting 30,000 additional passengers is physically inconsistent. The orchestrator must combine alternatives, spread flows over time, and protect critical nodes.

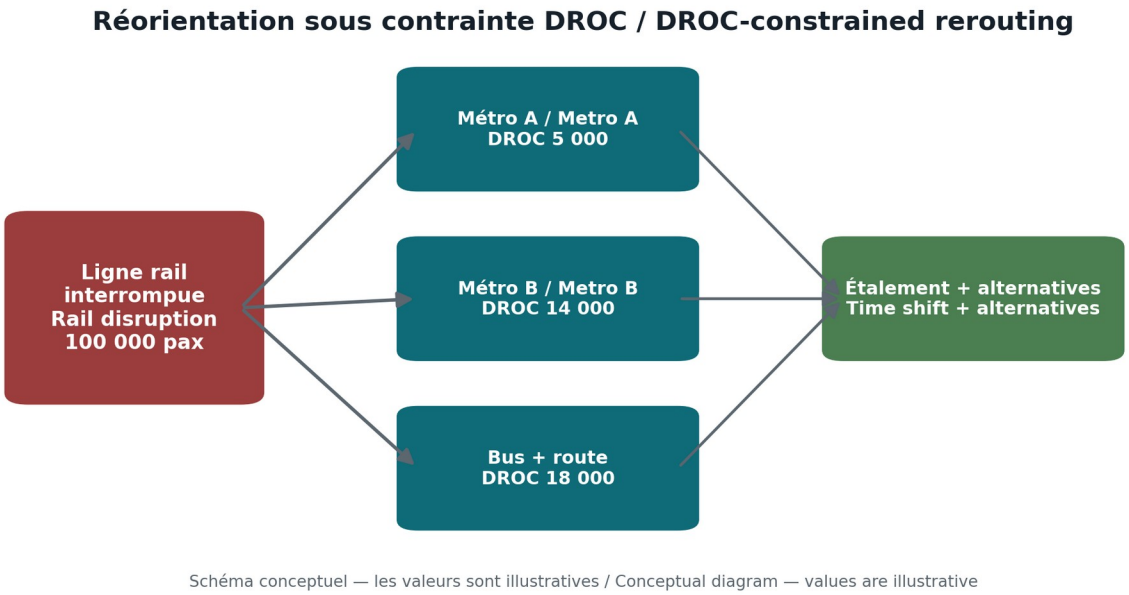


Figure 5 — Multimodal rerouting under DROC constraints. Values are illustrative only.

The question is no longer 'which path exists?' but 'which combination of flows can be absorbed by the physical system when passengers reach each resource?'

11. Resilience, robustness and uncertainty

Real-time data are not certainty. Future capacity is always associated with a horizon Δt, an uncertainty level, and a prudence rule. It depends on forecasts of congestion propagation, incident duration, rolling-stock availability, staff availability, maintenance completion, and energy state. The robust capacity in Equation (5) reduces usable capacity when uncertainty increases. The parameter λ can represent an operating conservatism level based on context and criticality.

This opens the path to robust or stochastic optimization. Future validation should compare alternative λ policies and measure the trade-off between unused capacity and saturation risk.

12. Safety, cybersecurity and auditability

- Orchestration never transfers the operator's safety responsibility.
- No optimum calculation may bypass interlockings, safety restrictions, or evacuation rules.
- Shared data should be minimized, timestamped, authenticated, and traceable.
- Recommendations should be explainable and reconstructable after the event.
- Fallback policy must cover communication loss, conflicting data, stale information, low confidence, and cyberattack.
- Failure of the federation must never prevent an operator from continuing to operate its own system safely.

13. Equity and the public-policy objective function

System Optimum may require some travelers to accept a less favorable route in order to reduce total congestion. This is not merely mathematical: it concerns fairness, consent, accessibility, pricing, and legitimacy of the objective function. The weights w_i should therefore not be learned without governance; they represent transport-policy choices.

Validation should measure the distribution of detours, not only their average. System performance must not improve through persistent concentration of individual penalties on the same areas or traveler groups.

14. Research hypotheses and validation protocol

1. H1 — Dynamic residual capacity represents mobilizable capacity more realistically than nominal or static capacity.
2. H2 — DROC-based orchestration reduces congestion propagation during multimodal disruptions.
3. H3 — Explicit maintenance state changes some assignment or supply-reinforcement decisions.
4. H4 — Explicit energy constraints change some supply or reallocation decisions.
5. H5 — Forecast DROC reduces rerouting toward resources that will be saturated upon arrival.
6. H6 — Federated architecture can generate system-level benefit without complete centralization of data and control.
7. H7 — Explicit uncertainty improves decision robustness relative to deterministic forecast capacity.

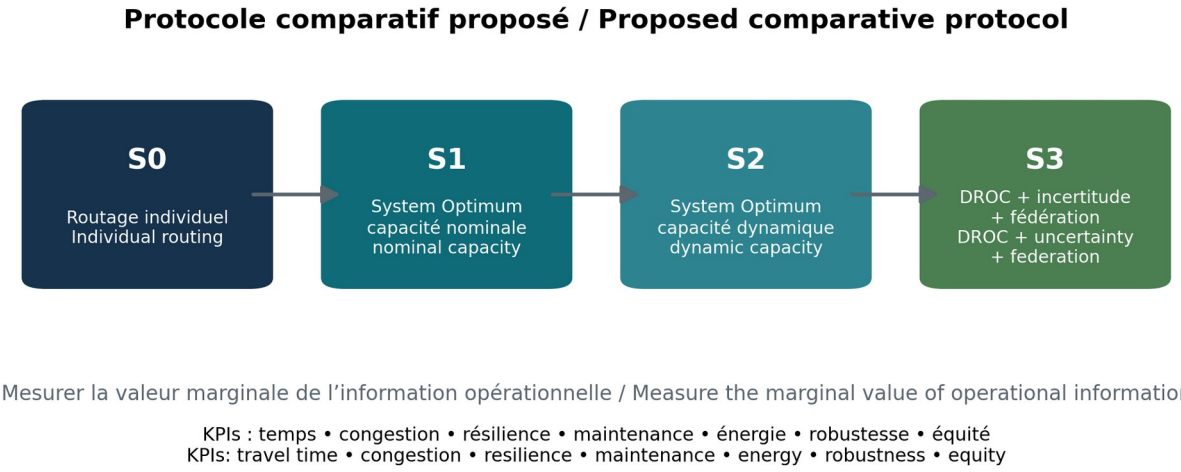


Figure 6 — Proposed S0–S3 validation program. No S3 performance result is claimed at this stage.

Proposed metrics include: mean and P95 travel time, maximum congestion, residual capacity, disruption propagation, recovery time, use of degraded assets, peak power, total energy, constraint violations, forecast-error sensitivity, and equity of detours.

15. Research gap, proposed contribution and limitations

Preliminary literature confirms that several fields associated with DROC already contain advanced work, although at different levels of maturity and validation: MM-DTA [4,5], digital twins and system optimization [6,8], railway maintenance [7], System-of-Systems interoperability [9], federated data spaces and multimodal rail mobility [11,12], and interoperable digital twins [13]. The contribution must therefore not be framed as inventing these components.

> **Proposed contribution to be tested: formalize Dynamic Residual Operational Capacity (DROC) as a common interface between the cyber-physical state of transport networks and federated multimodal orchestration mechanisms, explicitly integrating residual capacity, forecast horizon, uncertainty, and non-compensable operational constraints.**

This remains a gap hypothesis. A systematic review using PRISMA or an equivalent method should code at least: multimodality, UE/SO, dynamic capacity, residual capacity, forecasting, infrastructure, rolling stock, staff, maintenance, energy, disruptions, digital twin, uncertainty, real time, federation, governance, equity, and real-world validation.

Current limitations are substantial: data quality, intermodal standardization, confidentiality, cybersecurity, governance, liability, social acceptability, computational complexity, and absence of empirical demonstration. DROC must therefore be treated as a research program rather than a proven operational solution.

16. Conclusion

Digital mobility should not only answer 'what is the best route?'. In a disrupted multimodal system, it must also understand what infrastructure, assets, staff, and energy can actually provide when redirected flows arrive.

DROC proposes a reasoning chain: nominal capacity → technical capacity → operational capacity → residual capacity → robust forecast capacity. This variable can then become a shared language between physical systems and a federated orchestration layer.

> **Mobility is not only a graph of routes. It is dynamic industrial capacity that must be matched with dynamic demand.**

Références / References

[1] Wardrop, J. G. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1(3), 325–362. DOI: 10.1680/ipeds.1952.11259.

[2] Beckmann, M. J., McGuire, C. B., & Winsten, C. B. (1956). Studies in the Economics of Transportation. Yale University Press / Cowles Commission for Research in Economics, 232 pp.

[3] Sheffi, Y. (1985). Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Prentice-Hall.

[4] Fokker, E. S., van der Mei, R. D., & Dugundji, E. R. (2026). From Models to Mobility Systems: A Survey of Multimodal Dynamic Traffic Assignment. Operations Research Forum, 7, Article 58. DOI: 10.1007/s43069-026-00642-1.

[5] Cun, D., Du, M., Cheng, L., & Chen, A. (2026). Multi-agent reinforcement learning with a hybrid sequential reward feedback strategy for dynamic multi-modal traffic assignment. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 185, 105545. DOI: 10.1016/j.trc.2026.105545.

[6] Li, W., Wang, B., Sun, R., Ai, L., & Lin, Z. (2025). Energy-efficient multimodal mobility networks in transportation digital twins: Strategies and optimization. Energy, 318, 134587. DOI: 10.1016/j.energy.2025.134587.

[7] de Weert, Y. R., Gkiotsalitis, K., & van Berkum, E. C. (2024). Improving the scheduling of railway maintenance projects by minimizing passenger delays subject to event requests of railway operators. Computers & Operations Research, 165, 106580. DOI: 10.1016/j.cor.2024.106580.

[8] Krmac, E., & Djordjevic, B. (2024). Digital Twins for Railway Sector: Current State and Future Directions. IEEE Access, 12, 108597–108615. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3439471.

[9] Sadeghi, M., Carenini, A., Corcho, O., Rossi, M., Santoro, R., et al. (2024). Interoperability of heterogeneous Systems of Systems: from requirements to a reference architecture. The Journal of Supercomputing, 80, 8954–8987. DOI: 10.1007/s11227-023-05774-3.

[10] European Commission (2017). Commission Implementing Regulation (EU) 2017/2177 of 22 November 2017 on access to service facilities and rail-related services. Official Journal of the European Union, L 307, 1–13.

[11] Europe's Rail Joint Undertaking. FP1-MOTIONAL — Network management planning and control & Mobility Management in a multimodal environment and Digital Enablers. Project 101101973, 2022–2026.

[12] European Commission, CORDIS (2025/2026). FP1-MOTIONAL periodic reporting: Integration of Rail Traffic with Door-to-Door Mobility; Federated Data Space; Digital Twin and conceptual data models. Grant Agreement 101101973.

[13] Digital Twin Consortium (2026). Interoperable Digital Twins for Multimodal Transport Networks: Optimizing Passenger and Freight Journeys. Industry white paper, January 2026. (Industry reference; not peer reviewed.)

Annexe A / Appendix A — Matrice de revue systématique / Systematic review coding matrix

Cette matrice est destinée à tester le gap scientifique et non à le présupposer. / This matrix is intended to test the research gap rather than assume it.

Dimension	Codage / Coding	Question de revue / Review question
Multimodalité / Multimodality	Oui/Non	Au moins deux modes interagissent-ils dans le modèle ?
UE / SO	UE / SO / hybride	La fonction objectif distingue-t-elle décision individuelle et performance système ?
Capacité dynamique	Oui/Non	La capacité varie-t-elle dans le temps ?
Capacité résiduelle	Oui/Non	Les engagements déjà consommateurs de capacité sont-ils déduits ?
Prévision	Oui/Non	La capacité future à l'horizon d'arrivée est-elle estimée ?
Maintenance	Oui/Non	L'état ou le programme de maintenance modifie-t-il la capacité ?
Énergie	Oui/Non	Puissance, énergie ou recharge limitent-elles la décision ?
Personnel	Oui/Non	Les ressources humaines sont-elles une contrainte explicite ?
Digital Twin	Oui/Non	Un jumeau numérique produit-il un état ou une prévision ?
Incertitude	Oui/Non	La confiance ou l'incertitude est-elle représentée ?
Fédération	Oui/Non	Les données restent-elles sous contrôle de plusieurs acteurs ?
Gouvernance	Oui/Non	Les autorités, permissions et responsabilités sont-elles explicites ?
Équité	Oui/Non	Les effets distributifs sur les voyageurs sont-ils évalués ?
Validation	Simulation / données / pilote	La contribution est-elle validée au-delà d'un cadre conceptuel ?

Annexe B / Appendix B — Abréviations / Abbreviations

Acronyme	English	Français
DROC	Dynamic Residual Operational Capacity	Capacité opérationnelle résiduelle dynamique
UE	User Equilibrium	Équilibre utilisateur
SO	System Optimum	Optimum système
MM-DTA	Multimodal Dynamic Traffic Assignment	Affectation dynamique multimodale
MaaS	Mobility as a Service	Mobilité en tant que service
DT	Digital Twin	Jumeau numérique
OCC/PCC	Operations/Command Control Center	Centre de contrôle / poste de commande
TMS	Traffic Management System	Système de gestion du trafic
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	Supervision et acquisition de données
CMMS/GMAO	Computerized Maintenance Management System	Gestion de maintenance assistée par ordinateur

© 2026 Issame Garchali — GICMEI. Preprint conceptual paper.