

# CIGI QUALITA MOSIM 2025

## Un Jumeau Numérique pour la Résilience d'un Système de Systèmes : Cas d'Application à une Ville Intelligente

MERIEM SMATI<sup>1,2</sup>, CHRISTOPHE DANJOU<sup>2</sup>, JANNIK LAVAL<sup>1</sup>, VINCENT CHEUTET<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INSA LYON, UNIVERSITE LUMIERE LYON 2, UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1, UNIVERSITE JEAN MONNET SAINT-ETIENNE, DISP UR4570, VILLEURBANNE, 69621, FRANCE

[meriem.smati@insa-lyon.fr](mailto:meriem.smati@insa-lyon.fr)

[vincent.cheutet@insa-lyon.fr](mailto:vincent.cheutet@insa-lyon.fr)

[jannik.laval@univ-lyon.fr](mailto:jannik.laval@univ-lyon.fr)

<sup>2</sup> LABORATOIRE POLY-INDUSTRIE 4.0, DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET GENIE INDUSTRIEL, POLYTECHNIQUE MONTREAL, MONTREAL, QUEBEC, CANADA

[meriem.smati@polymtl.ca](mailto:meriem.smati@polymtl.ca)

[christophe.danjou@polymtl.ca](mailto:christophe.danjou@polymtl.ca)

---

**Résumé** – Les villes intelligentes s'appuient sur des systèmes interconnectés et autonomes pour optimiser les opérations et améliorer la qualité de vie des citoyens. Toutefois, ces systèmes doivent être résistants aux perturbations et garantir un fonctionnement continu malgré les divers défis imprévus. Dans cet article, nous appliquons une architecture par couches proposée dans l'un de nos travaux précédents, à un cas d'utilisation de ville intelligente. Le Système de Systèmes se compose de trois systèmes constitutifs : des feux de circulation intelligents, une flotte de camions de collecte des déchets et des poubelles intelligentes. Cette étude explore le potentiel des jumeaux numériques de Systèmes de Systèmes pour l'amélioration de la résilience en s'adaptant dynamiquement aux perturbations, optimisant l'allocation des ressources et en garantissant un service ininterrompu grâce à la surveillance en temps réel et à l'analyse prédictive.

**Abstract** – Smart cities rely on interconnected, autonomous systems to optimize operations and improve the quality of life for citizens. However, these systems must be resilient to disruptions, ensuring continuous functionality despite unforeseen challenges. In this paper, we apply a layered architecture proposed in one of our previous works, to a smart city use case. The system of systems consists of three Constituent Systems: smart traffic lights, a fleet of waste collection trucks, and smart waste bins, all integrated into an Internet of Things ecosystem. This study explores the potential of system of systems digital twins on enhancing the system's resilience by dynamically adapting to disruptions, optimizing resource allocation, and ensuring uninterrupted service through real-time monitoring and predictive analytics.

**Mots clés** – jumeaux numériques, système de systèmes, résilience, ville intelligente, internet des objets.

**Keywords** – digital twins, system of systems, resilience, smart city, internet of things.

---

### 1 INTRODUCTION

Une ville intelligente est un environnement dynamique et un système de systèmes complexe où plusieurs systèmes autonomes interagissent pour atteindre de nombreux objectifs, tels que la gestion efficace des ressources, l'amélioration des services publics, l'optimisation de la qualité de vie et d'autres fonctions urbaines. Ces interactions et communications entre les Systèmes Constitutifs (CS) indépendants offrent des avantages significatifs, mais la complexité qu'elles engendrent pose également des défis majeurs, nécessitant des mécanismes de surveillance et de contrôle avancés pour garantir l'efficacité, l'adaptabilité et la résilience.

Un système de systèmes, contrairement aux systèmes monolithiques traditionnels, se caractérise par une *indépendance opérationnelle* et *managériale* [Maier, 1998], où chaque CS conserve son propre objectif et sa propre gestion tout en contribuant au système global. D'autres caractéristiques

incluent la *distribution géographique*, car les CS sont souvent dispersés à différents endroits tout en restant interconnectés, le *développement évolutif*, signifiant que le système de systèmes évolue au fil du temps avec l'intégration ou la suppression de nouveaux systèmes, et le *comportement émergent*, où les interactions entre les CS conduisent à des capacités dépassant celles des systèmes individuels [Sage et Cuppan, 2001].

Les villes intelligentes illustrent parfaitement ces caractéristiques, car elles intègrent divers CSs, tels que les réseaux de transport, les réseaux énergétiques et les systèmes de gestion des déchets, dans une infrastructure unifiée et intelligente. Cependant, assurer une coordination efficace et une résilience dans un tel système de systèmes exige des solutions avancées.

La solution choisie est celle des jumeaux numériques. Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d'un système physique, souvent appelé jumeau physique, qui reçoit en continu des données en temps réel pour simuler, prédire et optimiser ses opérations. La capacité à créer une réplique est

rendue possible grâce à une communication bidirectionnelle entre les deux entités [Grieves, 2015 ; Rauch & Pietrzyk, 2019]. Cependant, la mise en œuvre de jumeaux numériques pour un système de systèmes introduit des complexités dues à l'indépendance, à l'hétérogénéité et à l'évolutivité des CSs. Pour relever ces défis, une architecture capable de gérer des systèmes décentralisés tout en assurant une coordination efficace est nécessaire.

Dans nos travaux précédents [Smati et al., 2025], nous avons introduit une architecture en couches pour les jumeaux numériques de systèmes de systèmes (*SoS DT*), illustrée dans la (Figure 1), qui aborde les limitations et complexités mentionnées précédemment. En nous appuyant sur cette architecture, cet article présente une étude basée sur l'IoT, où le système de systèmes est une ville intelligente composée de trois CSs : des feux de circulation intelligents, une flotte de camions de collecte des déchets et des poubelles intelligentes. Le jumeau numérique du système de systèmes est exploré pour renforcer la résilience en simulant divers scénarios, en évaluant l'adaptabilité du système et en améliorant la prise de décision dans les environnements urbains.

Le reste de l'article est organisé comme suit : la section 2 passe en revue les travaux connexes, la section 3 explique l'architecture proposée précédemment. La section 4 décrit l'application de l'architecture du *SoS DT* au cas d'utilisation de la ville intelligente. La section 5 expose les scénarios potentiels et les métriques pour évaluer la résilience d'un système de systèmes. Enfin, la section 7 conclut l'article et esquisse les directions futures de recherche.

## 2 TRAVAUX CONNEXES

L'intersection entre les jumeaux numériques et les systèmes de systèmes a été explorée dans divers domaines, notamment dans le domaine de fabrication, des transports et de la santé. Cependant, l'application des jumeaux numériques de systèmes de systèmes de villes intelligentes est encore émergente. Des études antérieures ont mis en évidence le potentiel des jumeaux numériques pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la fonctionnalité des systèmes. Une analyse approfondie par [Batty et al., 2018] explore le rôle des modèles de jumeaux numériques dans la planification urbaine et la gestion de la mobilité, soulignant leur capacité à simuler les dynamiques urbaines et à optimiser les flux de transport. De même, [Bibri et Krogstie, 2019] explorent l'intersection entre les jumeaux numériques et la durabilité, en mettant l'accent sur la manière dont la gestion des déchets basée sur les jumeaux numériques peut contribuer à l'économie circulaire dans les villes intelligentes.

Dans le domaine de la gestion du trafic, des études récentes ont élargi le champ d'application des jumeaux numériques. [Rasheed et al., 2020] proposent une revue complète de la technologie des jumeaux numériques, en se concentrant sur son intégration avec l'apprentissage automatique pour l'analyse prédictive et son rôle significatif dans le développement des villes intelligentes. [Sun et al., 2020] explorent les jumeaux numériques urbains (UDT, Urban Digital Twins) et leur rôle crucial dans le développement de villes plus intelligentes, en se concentrant sur la durabilité et la planification urbaine. L'intégration des jumeaux numériques avec des tableaux de bord géospatiaux basés sur le cloud a également été explorée pour la planification de la résilience, [Chen et al., 2024] introduisent un cadre qui combine un UDT avec un tableau de bord géospatial pour visualiser les vulnérabilités des infrastructures critiques à différentes échelles spatiales et temporelles.

Malgré ces avancées, les recherches existantes n'ont pas encore proposé une approche intégrée et basée sur les jumeaux numériques pour un système de systèmes visant à renforcer la résilience des villes intelligentes. Cet article comble cette lacune en étendant les études antérieures et en démontrant comment un jumeau numérique de système de systèmes peut améliorer la prise de décision en temps réel et l'adaptabilité du système dans un contexte urbain.

## 3 ARCHITECTURE DE SoS DT POUR UN CAS D'UTILISATION DE VILLE INTELLIGENTE

### 3.1 Aperçu de l'Architecture Précédemment Proposée

Dans nos travaux précédents [Smati et al., 2025], nous avons proposé une architecture en couches pour le *SoS DT*, combinant des jumeaux numériques individuels pour chaque CS avec une couche globale de *SoS DT* pour superviser et coordonner leurs interactions. Cette architecture aborde les défis liés à l'autonomie, à l'évolutivité et au traitement des données en temps réel, la rendant adaptée à des environnements complexes comme les villes intelligentes.

Comme illustré dans la (Figure 1), elle repose sur une approche multi-jumeaux numériques où chaque CS du système de système possède son propre jumeau numérique (*DT*, *Digital Twin*), qui reflète le jumeau physique en utilisant des données en temps réel provenant de son support de communication (*CM*, *Communication Medium*) correspondant.

Le système de jumeaux numériques (*System of DTs*) est composé de jumeaux numériques ainsi que la réplique des interactions entre les CS physiques, permettant une surveillance et une analyse en temps réel. Cette approche est soutenue par

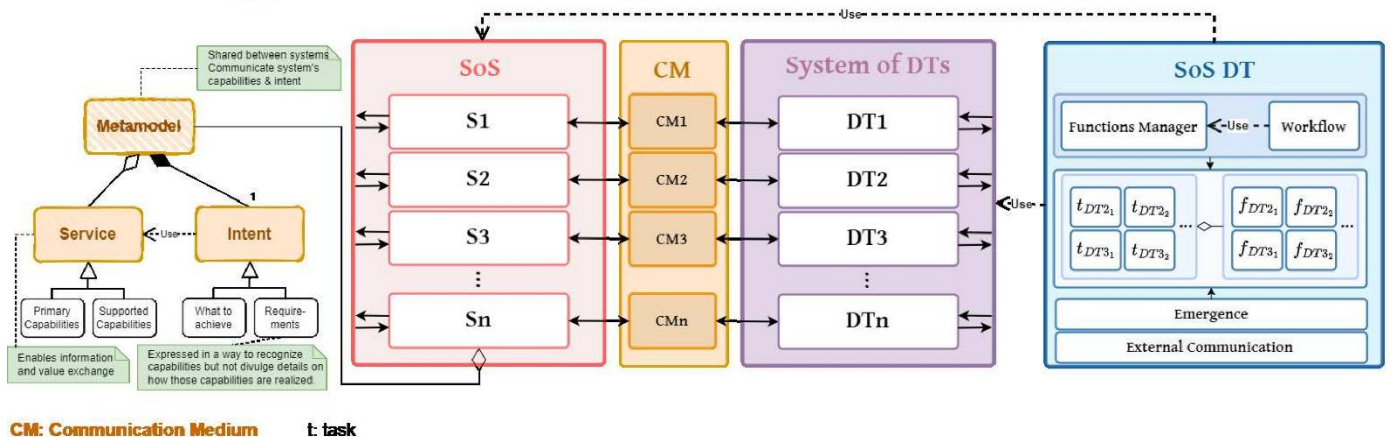


Figure 1. Architecture Proposée de *SoS DT* [Smati et al., 2025]

[Olsson et Axelsson, 2023], qui ont mis en avant les avantages d'une architecture de jumeaux numériques distribuée pour la gestion d'environnements multi-systèmes. Cependant, cela n'est possible qu'au niveau théorique, c'est pourquoi la couche globale de *SoS DT* sert d'orchestrateur du *System of DTs*, fournissant un mécanisme de contrôle intégré, facilitant un flux de données rationalisé, une allocation efficace des ressources et des opérations synchronisées au sein du jumeau numérique du système de systèmes. L'architecture proposée est conçue pour renforcer la résilience des systèmes de systèmes en offrant une surveillance en temps réel, une analyse prédictive et des réponses adaptatives aux perturbations.

### 3.2 Architecture du SoS DT Adaptée à un Cas d'Utilisation de Ville Intelligente

L'architecture *SoS DT* pour une ville intelligente est illustrée dans (Figure 2). Elle se compose de trois couches fondamentales :

- La couche du système de systèmes (*SoS, System of Systems*), qui représente les composants physiques de la ville intelligente (jumeau physique) ;
- La couche *System of DTs*, qui virtualise et numérise le jumeau physique pour permettre une surveillance en temps réel et des traitements de résilience en utilisant les *CMs* ;

- La couche *SoS DT*, responsable de la gestion et l'orchestration des communications et des évaluations de résilience.

Cette architecture permet un comportement dynamique du système, garantissant que les opérations de la ville intelligente restent efficaces et adaptatives, même en réponse à des défaillances ou à des conditions changeantes.

Au niveau de la couche *SoS*, trois *CSs* interagissent pour optimiser la mobilité urbaine et la gestion des déchets :

- *CS1* – Feux de circulation intelligents : régule la mobilité urbaine en ajustant les signaux lumineux en fonction de la congestion en temps réel. Ce système comprend les matériels, capteurs et technologies suivants :
  - Raspberry Pi : agit comme contrôleur local, traitant les entrées des capteurs et gérant les états des feux.
  - Kits de sockets Grove (vert, rouge, jaune) : contrôlent les signaux lumineux de manière dynamique.
  - RCWL-0516 : utilise la détection radar pour identifier la présence de véhicules et ajuster la durée des feux en conséquence.
  - Protocole MQTT : utilisé pour envoyer l'état des feux et les données de distance au *CM*,

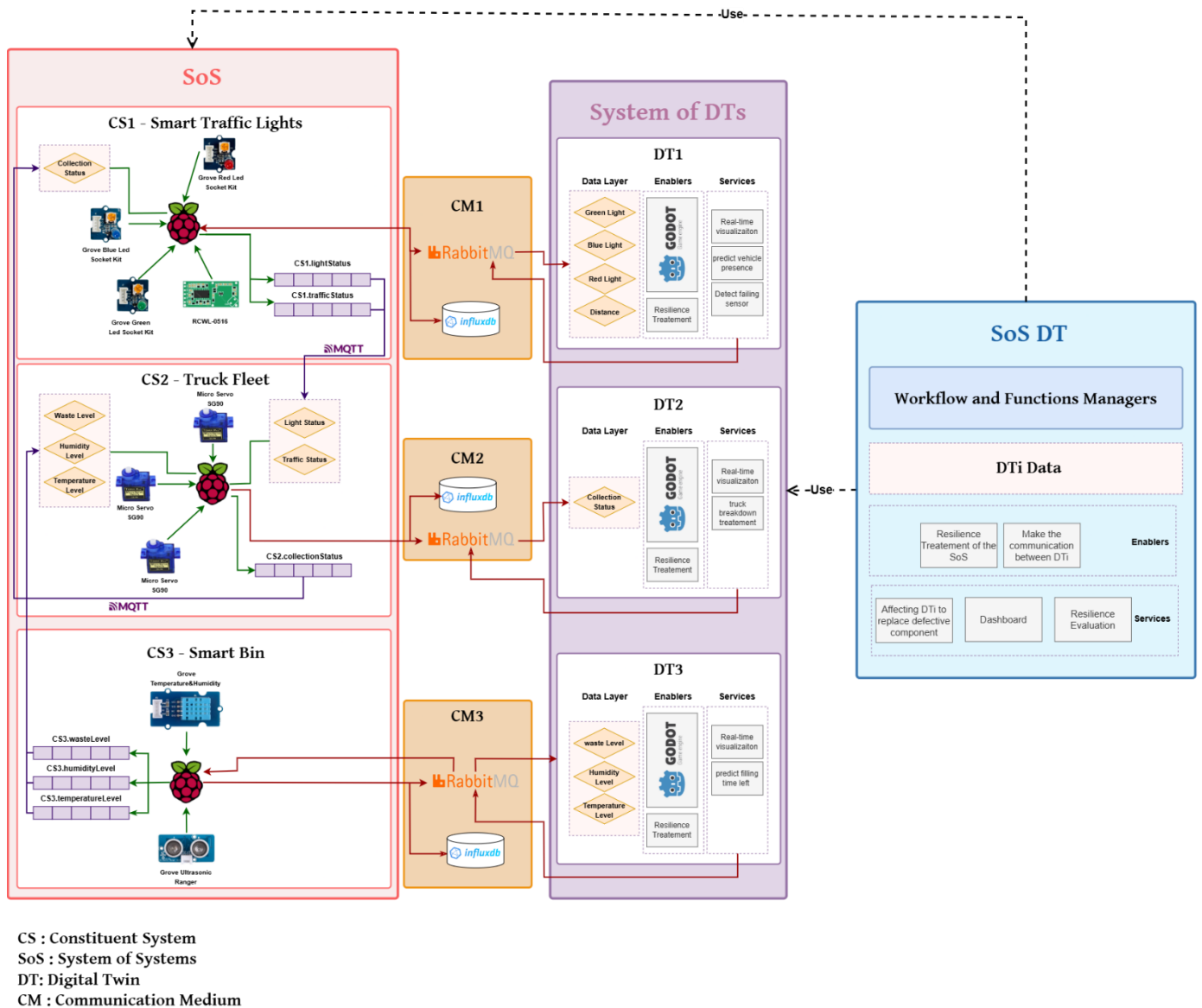


Figure 2. Architecture SoS DT Appliquée sur un Cas d'Etudes de Ville Intelligente

qui sert de tunnel entre le jumeau physique et le jumeau numérique.

- CS2 – Flotte de camions : une flotte de collecte des déchets qui optimise les itinéraires en fonction de la demande. Elle comprend les éléments suivants :
  - o Raspberry Pi : contrôle la détection du niveau de déchets et gère la communication de la flotte.
  - o Moteurs servo micro : représentation illustrative de trois camions en mouvement collectant les déchets.
  - o Protocole MQTT : similaire à CS1, il permet la communication entre les CS et DT2.
- CS3 – Poubelle intelligente : ce système surveille les niveaux de remplissage des poubelles et les conditions environnementales pour optimiser les horaires de collecte. CS3 est composée des éléments suivants :
  - o Raspberry Pi : collecte les données des capteurs de la poubelle et détermine si celle-ci est pleine ou non, puis envoie des notifications à CS2.
  - o Capteur de distance ultrasonique Grove : détecte les niveaux de déchets en temps réel.
  - o Capteur d'humidité et de température Grove : évalue les conditions environnementales à l'intérieur de la poubelle.
  - o Protocole MQTT : assure que les poubelles notifient la flotte de camions lorsqu'elles atteignent leur capacité et permet la communication avec DT3.

Pour permettre ces fonctionnalités, chaque CS physique possède un jumeau numérique correspondant. La combinaison de ces jumeaux numériques forme le *System of DTs*. Ces jumeaux numériques individuels travaillent uniquement sur les objectifs de leurs CS respectifs.

Chaque jumeau numérique est composé de :

- Une couche de données qui reflète les conditions du monde réel.
- Des activateurs tels que des modèles d'apprentissage automatique pour l'analyse prédictive.
- Des services qui fournissent la finalité du jumeau numérique, tels que la visualisation, l'aide à la décision et le traitement de la résilience.

Le *System of DTs* comprend :

- DT1 – jumeau numérique des feux de circulation intelligents :
  - o Simule le flux de trafic et la congestion en utilisant les données en temps réel provenant de CS1.
  - o Fournit une visualisation via le moteur Godot pour les décideurs.
  - o Intègre un modèle de prédiction pour la présence de véhicules afin d'ajuster le flux de trafic et la congestion.
- DT2 – jumeau numérique de la flotte de camions :
  - o Simule le routage des véhicules et l'efficacité de la collecte des déchets.
  - o Met en œuvre des mécanismes tolérants aux pannes pour assurer la continuité en cas de défaillances.
- DT3 – jumeau numérique des poubelles intelligentes :
  - o Simule et suit les niveaux de déchets et les conditions environnementales en temps réel.

- o Envoie des alertes lorsqu'une poubelle est pleine ou lorsque des motifs inhabituels sont détectés.
- o Soutient des stratégies prédictives de collecte des déchets.

Ces jumeaux numériques individuels interagissent dynamiquement au niveau du *SoS DT*, ce qui signifie que les changements dans un composant déclenchent des mises à jour dans les autres. Par exemple, lorsque le DT3 détecte une poubelle pleine, il notifie le DT2, qui optimise ensuite les itinéraires de collecte et met à jour DT1 pour minimiser les retards.

La couche *SoS DT* est le niveau le plus élevé de cette architecture et agit comme l'unité centrale de coordination et de prise de décision. Cette couche garantit que le *System of DTs* fonctionne de manière cohérente, en synchronisant les données en temps réel, les mécanismes de résilience et les stratégies d'optimisation.

Cette couche aborde plusieurs défis clés dans la mise en œuvre d'un jumeau numérique de système de systèmes résilient, notamment la puissance de calcul et l'évolutivité, car l'architecture découple les tâches intensives en calcul des jumeaux numériques individuels. Au lieu d'exécuter chaque calcul lourd au niveau des jumeaux numériques, la couche *SoS DT* extrait uniquement les processus, tâches et fonctions nécessaires.

Au sein de cette couche, le module de gestion de données des *DT<sub>i</sub>* agit comme le référentiel et l'unité de traitement des données centrales, en soutenant :

- La prise de décision en temps réel en exploitant les données historiques et les résultats des *DT<sub>i</sub>* nécessaires pour accomplir la tâche correspondante.
- L'évaluation de la résilience.

#### 4 SCENARIOS

Cette section explore les scénarios qui seront abordés dans la mise en œuvre de l'architecture *SoS DT*, où le jumeau numérique du système de systèmes renforce la résilience dans un cas d'utilisation de gestion des déchets d'une ville intelligente en répondant dynamiquement aux perturbations. Chaque scénario décrit un défi, l'intervention du *SoS DT* et le résultat final, démontrant l'adaptabilité et l'efficacité du système, tout en prenant en compte les capacités et propriétés de résilience. Dans ce contexte, nous définissons une *Capacité* comme la capacité d'un système à accomplir certaines fonctions ou à répondre à des défis ; une *Propriété*, quant à elle, fait référence aux caractéristiques ou attributs inhérents d'un système qui influencent sa résilience.

Les propriétés de la résilience sont [Bruneau et al., 2003 ; Liu et al., 2022 ; Hosseini et al., 2016] :

- Robustesse : capacité d'un élément à résister à la propagation des dommages et à ne pas subir de dégradation en présence d'un événement perturbateur. Elle est considérée comme l'une des propriétés les plus importantes de la résilience.
- Rapidité : vitesse à laquelle un système peut revenir à son état initial et atteindre ses objectifs, ou du moins à un niveau de fonctionnalité acceptable, après une perturbation.
- Ingéniosité : capacité d'un système à utiliser des ressources externes provenant d'un autre système ou de l'environnement externe pour se remettre sur la bonne voie.

- Redondance : c'est également l'une des propriétés de la résilience, mais ce n'est pas la caractéristique que nous recherchons, mais plutôt une solution plus rentable.

Et les capacités de résilience sont [Francis et Bekera, 2024] :

- Capacité d'absorption : "la capacité du système à absorber les perturbations et à se réorganiser tout en subissant des changements afin de conserver essentiellement la même fonction, structure, identité et rétroactions. Cela peut également être vu comme la capacité à résister aux chocs et à maintenir ses fonctions".
- Capacité d'adaptation : "la capacité du système à s'adapter aux changements internes ou externes en modifiant ses pratiques, politiques et règles pour faire face aux perturbations. Cela peut également être vu comme la capacité à apprendre et à s'adapter".
- Capacité de récupération/restauration : "la capacité du système à se rétablir rapidement après un impact. Cela inclut la mise en œuvre de comportements de réponse visant à renforcer la capacité à résister aux perturbations ou à se rétablir aussi rapidement que possible après un impact. La capacité de récupération peut être compromise si des investissements inadéquats sont réalisés en raison de désaccords entre les parties prenantes".

#### 4.1 Scénario 1 : Pluie intense perturbant la précision des capteurs

Un cas qui sera considéré pour ce premier scénario est une pluie soudaine et intense qui affecterait le CS3, où les propriétés et capacités de résilience démontrées seront la **robustesse**, l'**absorption** et l'**adaptation**.

Le capteur de distance ultrasonique Grove dans la poubelle, responsable de détecter les niveaux de déchets, commence à fournir des mesures incohérentes ou peu fiables en raison de l'accumulation excessive d'eau. Bien que le Raspberry Pi présent dans CS3 détecte les écarts dans les lectures des capteurs, le traitement local seul est insuffisant pour résoudre le problème. DT3 analyse les modèles passés d'accumulation des déchets et les conditions environnementales, lui permettant d'estimer les niveaux de remplissage lorsque les mesures directes des capteurs ne sont pas fiables.

La couche SoS DT intervient en ajustant les horaires de collecte des déchets en se basant sur les capacités estimées des poubelles plutôt que sur les données des capteurs en temps réel, et extrait les informations qui doivent être communiquées au DT2. Le DT2 reçoit les priorités de collecte mises à jour, garantissant que les poubelles susceptibles d'être pleines sont traitées en premier. Parallèlement, le SoS DT envoie une alerte pour avertir l'équipe de maintenance de réparer les poubelles affectées.

La robustesse est validée par la capacité du système de systèmes à résister aux défaillances des capteurs en mettant en œuvre des méthodes alternatives grâce au SoS DT. Les capacités de résilience incluent l'absorption des perturbations en passant à des modèles d'estimation et l'adaptation en ajustant dynamiquement les priorités de collecte.

#### 4.2 Scénario 2 : Panne de courant affectant les feux de circulation intelligents

Dans ce scénario, une panne de courant perturbe le fonctionnement du CS1, augmentant le risque d'embouteillages et d'accidents de la route. La propriété de **rapidité** et la capacité d'**adaptation** sont prises en compte.

Le Raspberry Pi correspondant de ce CS détecte la perte de provenance des données, et sur cette base, le SoS DT envoie des notifications au CS2 et active des règles de trafic locales

préconfigurées stockées sur chaque Raspberry Pi affecté. Pendant ce temps, le DT2 évalue les retards potentiels causés par les intersections non contrôlées et ajuste les itinéraires des camions de collecte des déchets en conséquence.

Cette intervention démontre la rapidité, car le système passe rapidement en mode de secours, et l'adaptation, car le flux de trafic est réorganisé en attendant le rétablissement complet de l'alimentation électrique.

#### 4.3 Scénario 3 : Panne mécanique d'un véhicule de collecte des déchets

Ce troisième scénario se produit lors d'une tournée de collecte programmée, où un camion de collecte des déchets dans CS2 subit une panne moteur, entraînant divers problèmes tels qu'une interruption du service et un risque de congestion routière. La propriété d'**ingéniosité** et la capacité de **récupération** sont prises en compte.

La défaillance est détectée et l'information est immédiatement transmise au DT2, qui informe à son tour la couche SoS DT. Cette dernière met en œuvre une stratégie de résilience reposant sur deux actions clés : premièrement, le DT2 réaffecte les tâches de collecte restantes du camion défaillant à d'autres véhicules opérationnels, garantissant ainsi que l'ensemble des bacs à déchets sont pris en charge ; deuxièmement, le DT1 ajuste les cycles des feux de signalisation à proximité afin de minimiser la congestion causée par le véhicule immobilisé, évitant ainsi des perturbations secondaires.

Ce scénario illustre la propriété d'ingéniosité, puisque les ressources du système sont redistribuées pour pallier la panne du camion, ainsi que la capacité de récupération, puisque les opérations de collecte reprennent efficacement malgré la défaillance.

## 5 METRIQUES DE RESILIENCE

La résilience est une exigence fondamentale pour garantir la continuité des services, l'adaptabilité aux perturbations et une gestion efficace des ressources. Les villes intelligentes fonctionnent comme des systèmes de systèmes, où une défaillance dans un sous-système peut se propager et impacter l'ensemble de l'infrastructure. Dans cette section, nous présentons les métriques de résilience utilisées pour évaluer l'efficacité du SoS DT dans l'amélioration de la résilience du système de systèmes physique. L'évaluation réalisée grâce à ces métriques permet de quantifier les bénéfices apportés par les jumeaux numériques à la résilience du système de systèmes et d'adopter une approche structurée pour mesurer leur impact.

Pour évaluer la résilience, plusieurs métriques clés sont considérées et résumées dans le (Tableau 1). Les précisions sur les métriques à maximiser, minimiser ainsi que leurs interprétations sont détaillées ci-dessous :

- L'Indice de Robustesse (RI) est à maximiser, car une valeur élevée indique une meilleure résistance à la dégradation des performances.
- L'Efficacité de l'Ingéniosité (RE) doit être améliorée afin d'éviter les inefficacités tout en garantissant une réponse efficace en cas de crise.
- La Rapidité (R) doit être minimisée, car des temps de récupération longs peuvent entraîner des interruptions prolongées des services.

En plus des propriétés de résilience, les capacités de résilience sont également prises en compte dans les métriques. Les capacités absorbative, adaptative et de récupération doivent être renforcées afin de prévenir des pertes significatives de performance, assurer une flexibilité dans la réponse aux perturbations et réduire au maximum le temps d'indisponibilité.

En complément des propriétés et capacités de résilience, des métriques de performance propres à chaque CS permettent une évaluation plus granulaire :

- L'Efficacité du Flux de Trafic (TFE) doit être optimisée pour réduire la congestion et améliorer la mobilité urbaine.
- Le Taux de Succès de Collecte (CSR) doit être augmenté afin de garantir une haute qualité de service et assurer un environnement urbain plus propre.

- La Précision du Niveau de Remplissage (FLA) doit être améliorée en réduisant les écarts entre les niveaux détectés et réels, permettant une prise de décision optimisée en matière de collecte des déchets. Plus les mesures des capteurs sont précises, plus le système peut anticiper et répondre efficacement aux besoins de gestion des déchets.

**Tableau 1. Métriques de Résilience d’un Système de systèmes**

Catégories	Métriques	Définition	Formule
Propriétés de Résilience	Indice de Robustesse (RI)	Capacité à résister aux perturbations sans dégradation des performances.	$RI = \frac{Q_{post}}{Q_{pre}}$ <p><math>Q_{pre}</math>: Niveau de performance avant la perturbation.  <math>Q_{post}</math>: Niveau de performance après l’application de la méthode de résilience.</p>
	Efficacité d’Ingéniosité (RE)	Aptitude à utiliser efficacement les ressources disponibles en période de crise.	$RME = \frac{Res_{utilized}}{Res_{available}}$ <p><math>Res_{utilized}</math>: Ressources utilisées pour atténuer les perturbations.  <math>Res_{available}</math>: Ressources totales disponibles.</p>
	Rapidité (R)	Durée nécessaire pour passer d’un état instable à un état stable.	$R = t_{recovery} - t_{disruption}$ <p><math>t_{recovery}</math>: Temps auquel le système retrouve sa stabilité.  <math>t_{disruption}</math>: Temps auquel la perturbation se produit.</p>
Capacités de Résilience	Capacité Absorptive	Capacité du système à minimiser la dégradation des performances face aux perturbations.	$Capacity_{absorb} = \frac{Q_{pre} - Q_{min}}{Q_{pre}}$ <p><math>Q_{min}</math>: Niveau de performance le plus bas atteint pendant la perturbation.</p>
	Capacité Adaptative	Aptitude à modifier les fonctions en réponse à de nouvelles conditions.	$Capacity_{adapt} = \frac{Q_{new}}{Q_{pre}}$ <p><math>Q_{new}</math>: Niveau de performance après l’application de la capacité.</p>
	Capacité de Récupération	Efficacité dans le retour à une fonctionnalité complète après une perturbation.	$Capacity_{recover} = \frac{Q_{post} - Q_{min}}{t_{recovery}}$
Métriques de Performance Metrics (par CS)	CS1 – Efficacité du Flux de Trafic	Efficacité de la réduction de la congestion.	$TFE = \frac{V_{free} - V_{congested}}{V_{free}}$ <p><math>V_{free}</math>: Vitesse optimale du véhicule en conditions de circulation fluide.  <math>V_{congested}</math>: Vitesse réelle du véhicule en situation de congestion.</p>
	CS2 – Taux de Succès de Collecte	Évalue l’efficacité de la collecte des déchets.	$CSR = \frac{B_{collected}}{B_{expected}}$ <p><math>B_{collected}</math>: Nombre réel de poubelles vidées.  <math>B_{expected}</math>: Nombre de poubelles attendues à être vidés.</p>
	CS3 – Précision du Niveau de Remplissage	Évalue la fiabilité des capteurs dans la détection du niveau de remplissage des déchets.	$FLA = 1 - \frac{ F_{detected} - F_{actual} }{F_{actual}}$ <p><math>F_{actual}</math>: Niveau de remplissage détecté par le capteur.  <math>B_{expected}</math>: Niveau de remplissage réel.</p>



## 6 CONCLUSION

Cette étude a appliqué l'architecture *SoS DT* proposée dans l'amélioration de la résilience des systèmes de systèmes à une infrastructure de ville intelligente. En exploitant cette architecture multicouches, ce travail a illustré comment les jumeaux numériques peuvent s'adapter dynamiquement aux perturbations, optimiser l'allocation des ressources et assurer la continuité des services dans des environnements complexes, en faisant un outil adapté pour garantir et renforcer la résilience.

Le cas d'usage étudié était un système de systèmes composé de trois systèmes constitutifs : des feux de signalisation intelligents, des flottes de camions de collecte des déchets et des bacs intelligents. Cette étude a permis d'apporter une application concrète de l'approche proposée, en mettant en évidence son potentiel pour répondre aux défis réels et concevoir des jumeaux numériques adaptés.

Malgré ces avancées, plusieurs défis et perspectives de recherche restent ouverts. L'un des principaux défis concerne l'évolutivité. Bien que cette étude ait exploré un nombre limité de CS, les travaux futurs devraient analyser comment l'architecture proposée peut s'adapter à des cas d'usage plus vastes et diversifiés. Une solution potentielle repose sur la modularité de l'architecture, mais une question clé reste à résoudre : « Comment un jumeau numérique d'un CS nouvellement intégré peut-il être conçu et inclus dans le jumeau numérique de système de systèmes ? »

Un autre axe de recherche important est l'implémentation pratique de l'architecture *SoS DT* de la ville intelligente, afin d'obtenir des résultats numériques et empiriques à partir des métriques définies. Cela permettrait une analyse comparative de la résilience du système de systèmes avec et sans intégration des jumeaux numériques, fournissant ainsi des preuves quantitatives de leur impact sur la résilience.

En conclusion, cette recherche a posé des bases solides pour l'utilisation des jumeaux numériques dans l'amélioration de la résilience des systèmes de systèmes. En relevant les défis identifiés et en élargissant le champ de cette étude, les avancées futures permettront d'affiner et d'optimiser davantage le paradigme du jumeau numérique de système de systèmes, contribuant ainsi au développement d'environnements plus adaptatifs et résilients.

## 7 REFERENCES

Grieves, Michael. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.

Smati, M., Cheutet, V., Danjou, C., & Laval, J. (2025). Digital Twin System of Systems: A Layered Architecture Proposal. In Proceedings of the 13th International Conference on Model-Based Software and Systems Engineering.

Rauch, L., & Pietrzyk, M. (2019). Digital twins as a modern approach to design of industrial processes. *Journal of Machine Engineering*, 19.

Maier, M. W. (1998). Architecting principles for systems-of-systems. *Systems Engineering: The Journal of the International Council on Systems Engineering*, 1(4), 267-284.

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., & al. (2012). *Smart cities of the future*. *European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 481-518.

Olsson, T., & Axelsson, J. (2023, June). Systems-of-systems and digital twins: A survey and analysis of the current knowledge. In *2023 18th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSe)* (pp. 1-6). IEEE.

Sage, A. P., & Cuppan, C. D. (2001). On the systems

engineering and management of systems of systems and federations of systems. *Information knowledge systems management*, 2(4), 325-345.

Chen, C., Han, Y., Galinski, A., Calle, C., Carney, J., Ye, X., & van Westen, C. (2024). Integrating urban digital twins with cloud-based geospatial dashboards for coastal resilience planning: A case study in Florida. *arXiv preprint arXiv:2403.18188*.

Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable cities and society*, 31, 183-212.

Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE access*, 8, 21980-22012.

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, 19(4), 733-752.

Liu, W., Shan, M., Zhang, S., Zhao, X., & Zhai, Z. (2022). Resilience in infrastructure systems: A comprehensive review. *Buildings*, 12(6), 759.

Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47-61.

Francis, R., & Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability engineering & system safety*, 121, 90-103.