

Jumeaux numériques systémiques pour optimiser les opérations industrielles

Recherche opérationnelle et jumeaux numériques systèmeiques : deux approches complémentaires

Exemples de transformation de réseaux logistiques

Daniel KROB (INCOSE Fellow)

Mars 2025



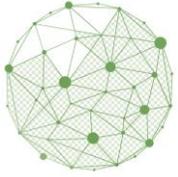
Systemic
Intelligence



Sigma



WorldLab



Agenda

1. Systemic Intelligence : qui sommes-nous ?

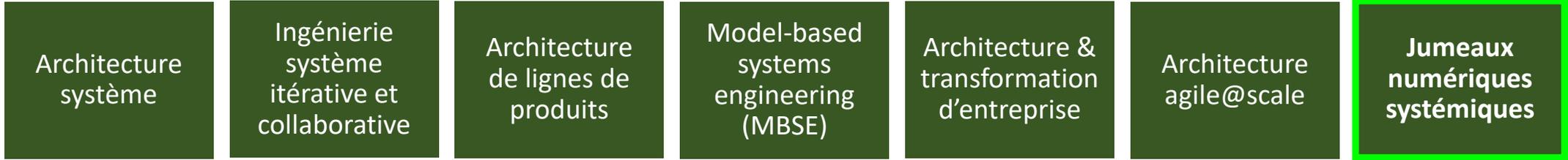
2. Introduction aux jumeaux numériques systémiques pour l'optimisation des opérations industrielles
3. Cas #1 : la transformation des flux logistiques du port de Dunkerque
4. Cas #2 : la transformation d'un réseau de distribution logistique national



Systemic Intelligence

Qui sommes-nous ?

Cœur de compétence



Offres

Conseil en ingénierie système
Expertise & formation
Développement de solutions
Animation de communauté

Equipe

≈ 40
collaborateurs

Chiffre d'affaires

≈ 8 M€
2024

Bureaux

Angers
Paris
Toulouse
Shanghai

Création

Spin-off - 2011

Partenaires



Programmes de formation

AIRBUS GROUP • ARIANE GROUPE •
NISSAN • RENAULT • SAFRAN •
SCHNEIDER ELECTRIC • STELLANTIS •
SOCIETE GENERALE

Méthode CESAM

≈ 10,000
professionnels formés
depuis 10 ans

Communauté

Communauté des
architectes systèmes

Événements

- CSDM Paris & Beijing
- Digital Twins Design & Operation (DTD&O)
- Club dirigeants

LinkedIn

≈ 10,000
followers

Systemic Intelligence développe & commercialise une **solution de jumeau numérique systémique** permettant de **modéliser, simuler & optimiser une infrastructure industrielle complexe**. Systemic Intelligence est une spin-off du groupe **CESAMES**, spécialisé en architecture de systèmes complexes, qui est issu de la **chaire d'ingénierie des systèmes complexes de l'Ecole Polytechnique**.



Systemic Intelligence

Notre équipe de direction



Daniel KROB, président de Systemic Intelligence, est un ancien professeur de l'Ecole Polytechnique et un ancien directeur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). C'est un **expert mondial en modélisation de systèmes**, reconnu comme Fellow de l'International Council on Systems Engineering (INCOSE).



Antoine RAUZY, directeur scientifique et technologique de Systemic Intelligence, est professeur à CentraleSupélec en France et à la Norwegian University of Science & Technology en Norvège. C'est un **expert mondial en simulation de systèmes**. Il a notamment développé la technologie de sûreté de fonctionnement AltaRica, utilisée dans le monde entier dans l'industrie pour outiller les études de sûreté.

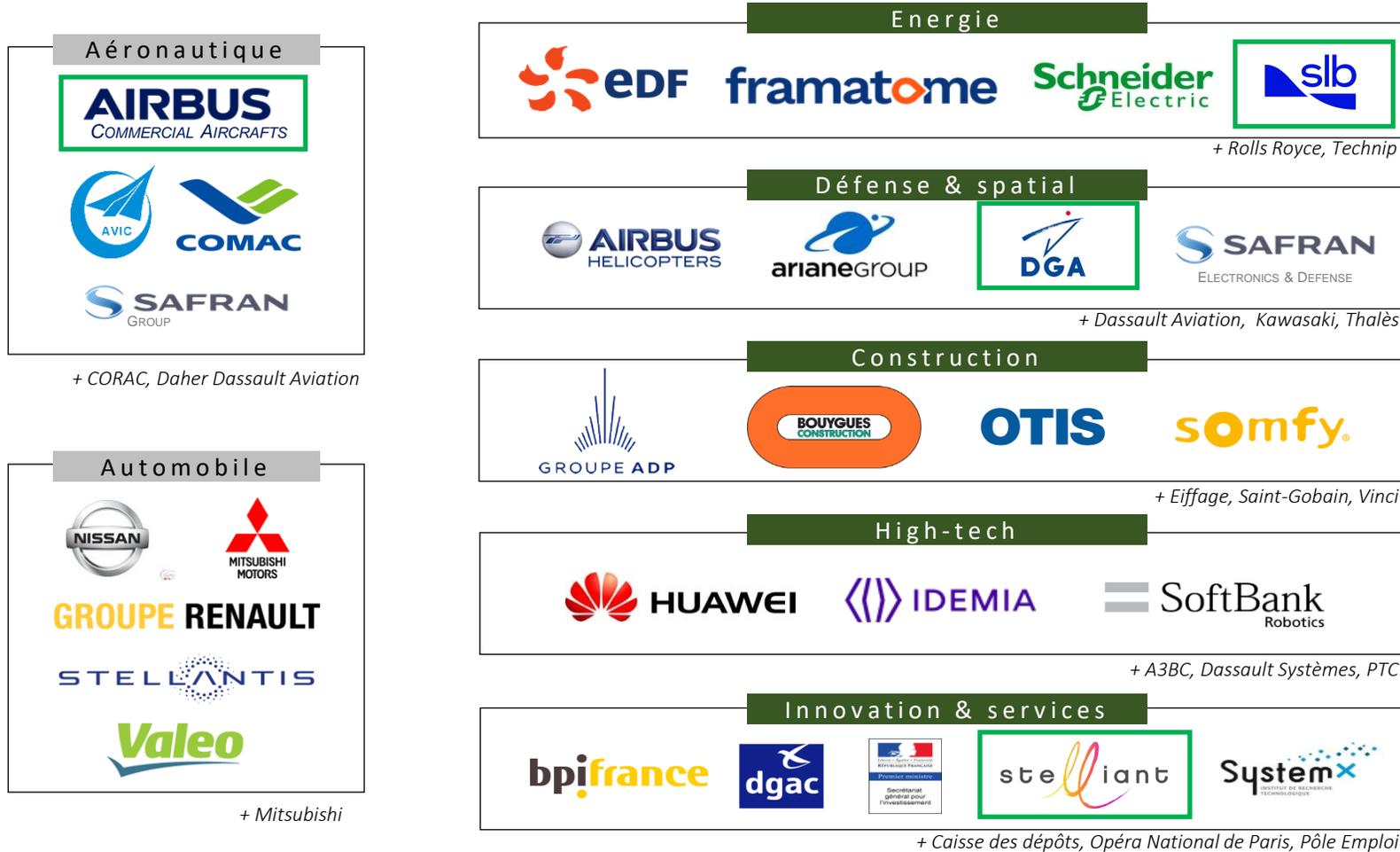




Systemic Intelligence

Notre écosystème industriel (1/2)

Les premiers clients de notre solution de jumeau numérique systémique



Aéronautique

AIRBUS COMMERCIAL AIRCRAFTS

AVIC, COMAC

SAFRAN GROUP

+ CORAC, Daher Dassault Aviation

Automobile

NISSAN, MITSUBISHI MOTORS

GROUPE RENAULT

STELLANTIS

Valeo

+ Mitsubishi

Logistique

Dunkerque PORT

LA POSTE, fives

Mines

BHP, NORDIC MINING

DEBSWANA Mining diamonds, enriching the nation

Ferroviaire

ALSTOM, Eurail

RATP, SNCF RÉSEAU

Notre écosystème de clients et partenaires industriels



Systemic Intelligence

Notre écosystème industriel (2/2)



Planification stratégique du système industriel étendu de l'A220



Planification stratégique de nouveaux flux logistiques au sein de port de Dunkerque



Transformation du processus presse à l'échelle nationale



Comparaison de systèmes de signalisation ferroviaire en situation de croissance de trafic



Conception optimale d'un entrepôt automatisé



Optimisation d'un processus industriel défense



Conception optimale d'une mine sous-marine en mer du Nord



Conception optimale d'un atelier agile de production de pièces d'éoliennes



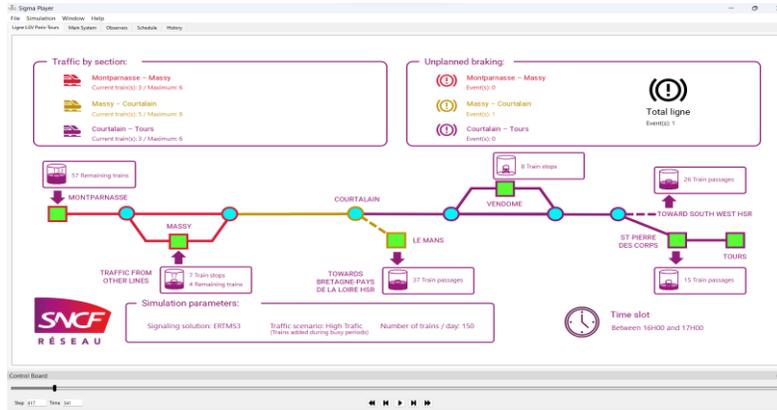
Analyse des impacts d'événements redoutés (inondation, feu, cyber-attaque) sur une usine industrielle

Nos premiers **exemples d'application industrielle** de notre solution de jumeau numérique systémique

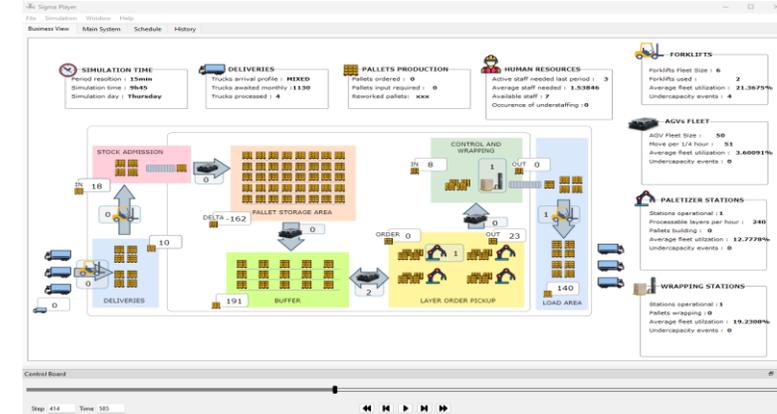


Exemples de jumeaux numériques systémiques

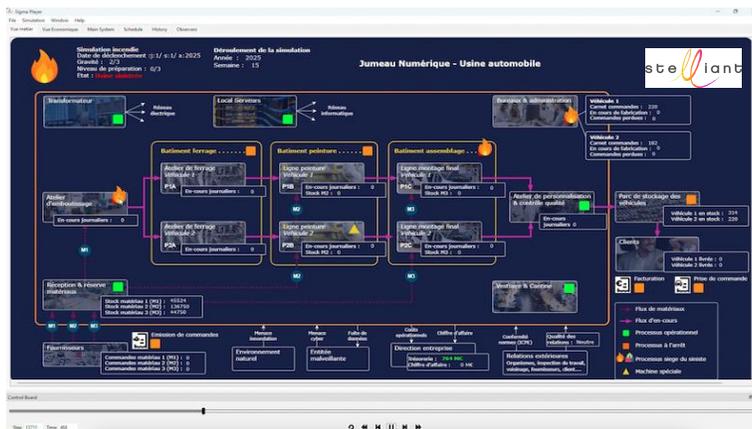
Planification stratégique et optimisation opérationnelle



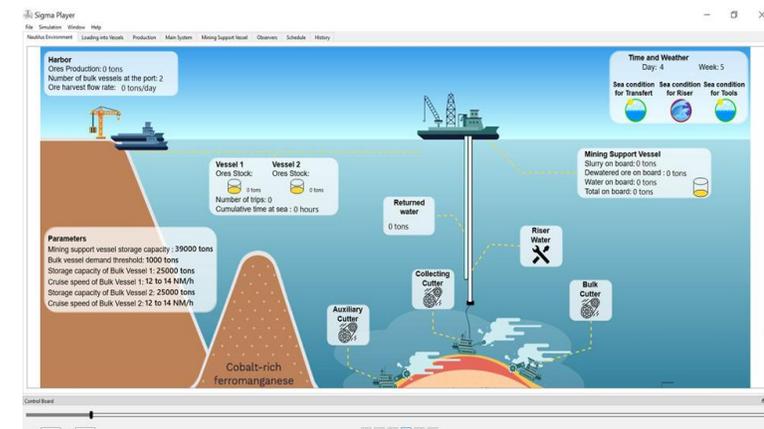
Trade-off : comparaison de 4 architectures ferroviaires de contrôle-commande sous 3 hypothèses de croissance du trafic



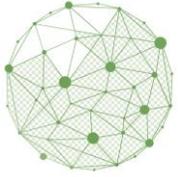
Configuration optimale : identification de la meilleure architecture pour un entrepôt automatisé pour absorber les pics de charge



Gestion des risques : conception de la meilleure stratégie assurantielle pour couvrir des risques industriels



Optimisation : identification de la meilleure architecture industrielle en tenant compte des conditions météorologiques



Agenda

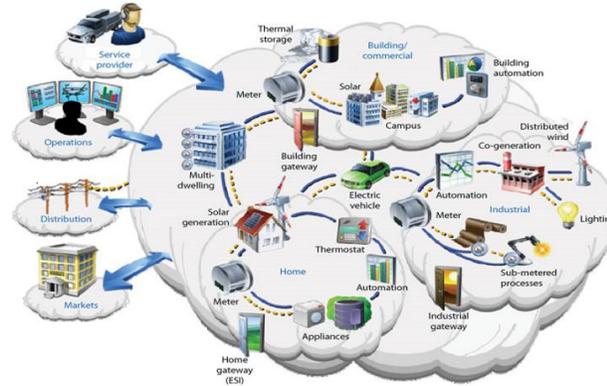
1. Systemic Intelligence : qui sommes-nous ?
- 2. Introduction aux jumeaux numériques systémiques pour l'optimisation des opérations industrielles**
3. Cas #1 : la transformation des flux logistiques du port de Dunkerque
4. Cas #2 : la transformation d'un réseau de distribution logistique national



Pourquoi : le périmètre d'application d'un jumeau numérique systémique



Optimisation des supply chains complexes



Optimisation des opérations et de la maintenance industrielle



Optimisation de la production industrielle



Minimisation des risques industriels



Les industries modernes doivent **optimiser leurs opérations industrielles complexes** (production, distribution, maintenance, exploitation) à **court et long terme** en intégrant des **contraintes économiques, politiques, sociales, technologiques, juridiques et environnementales**



Quoi : le périmètre fonctionnel d'un jumeau numérique systémique



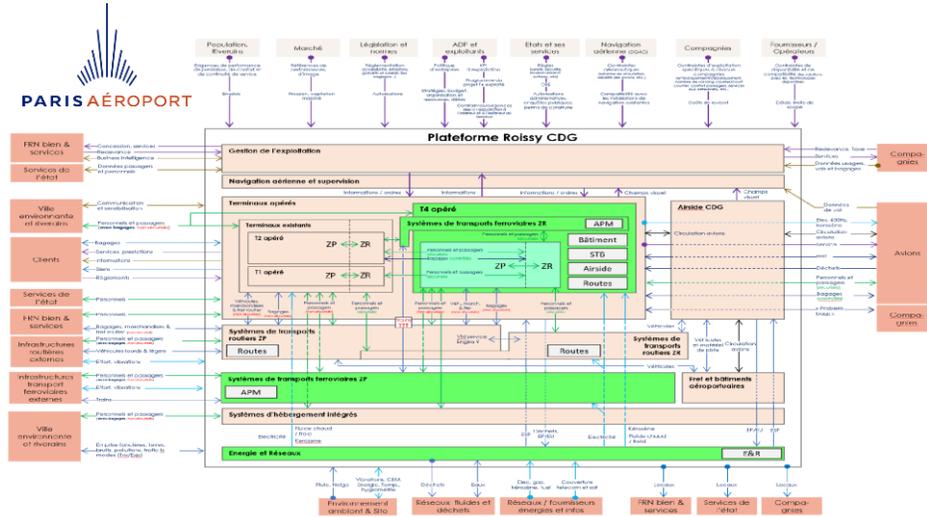
Infrastructures IOT & RFID



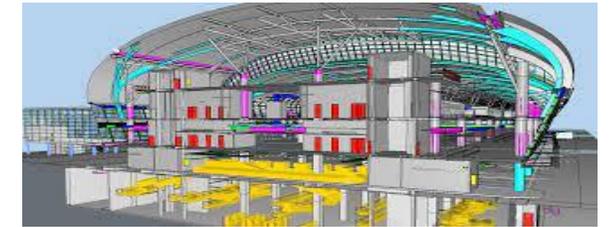
Applications intelligentes



Données



Modélisation & simulation de processus industriels



Maquettes numériques (DMU)



Building Information Modeling (BIM)



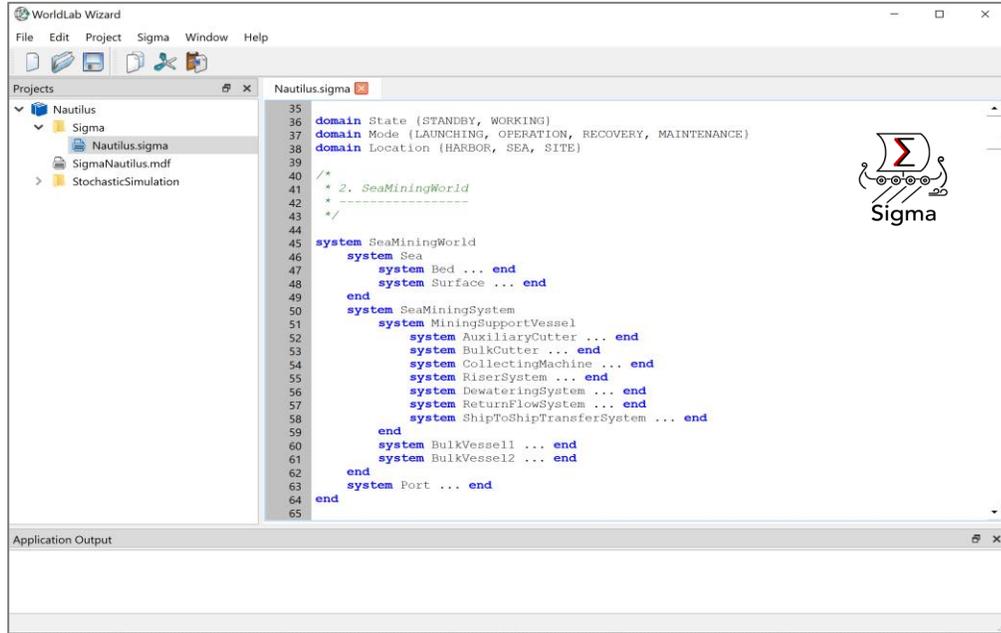
Indicateurs

Exemple d'un aéroport : la modélisation des processus métiers de l'entreprise sont au cœur d'un jumeau numérique systémique

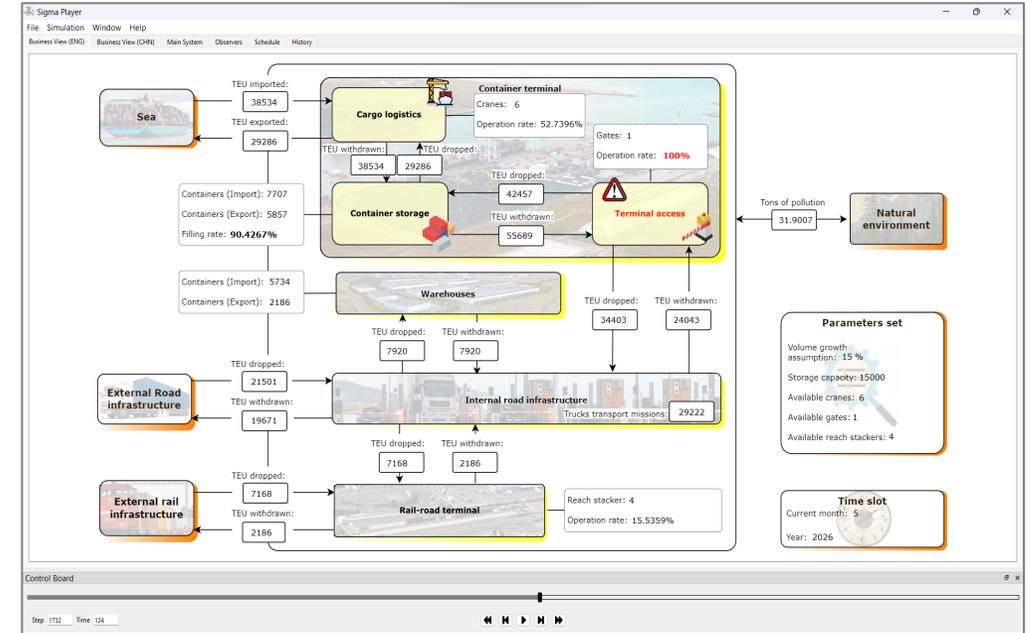
Les **jumeaux numériques systémiques** sont des solutions permettant de simuler et d'optimiser les **processus industriels complexes**, basés sur la **modélisation comportementale** des processus métiers d'un système industriel



Comment : le laboratoire d'expérimentation virtuelle WorldLab™ (1/3)



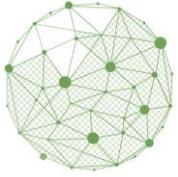
WorldLab™ Workshop



WorldLab™ Player

Pour concrétiser notre vision, nous avons développé la technologie **WorldLab™** avec deux facettes dédiées à deux types d'utilisateurs :

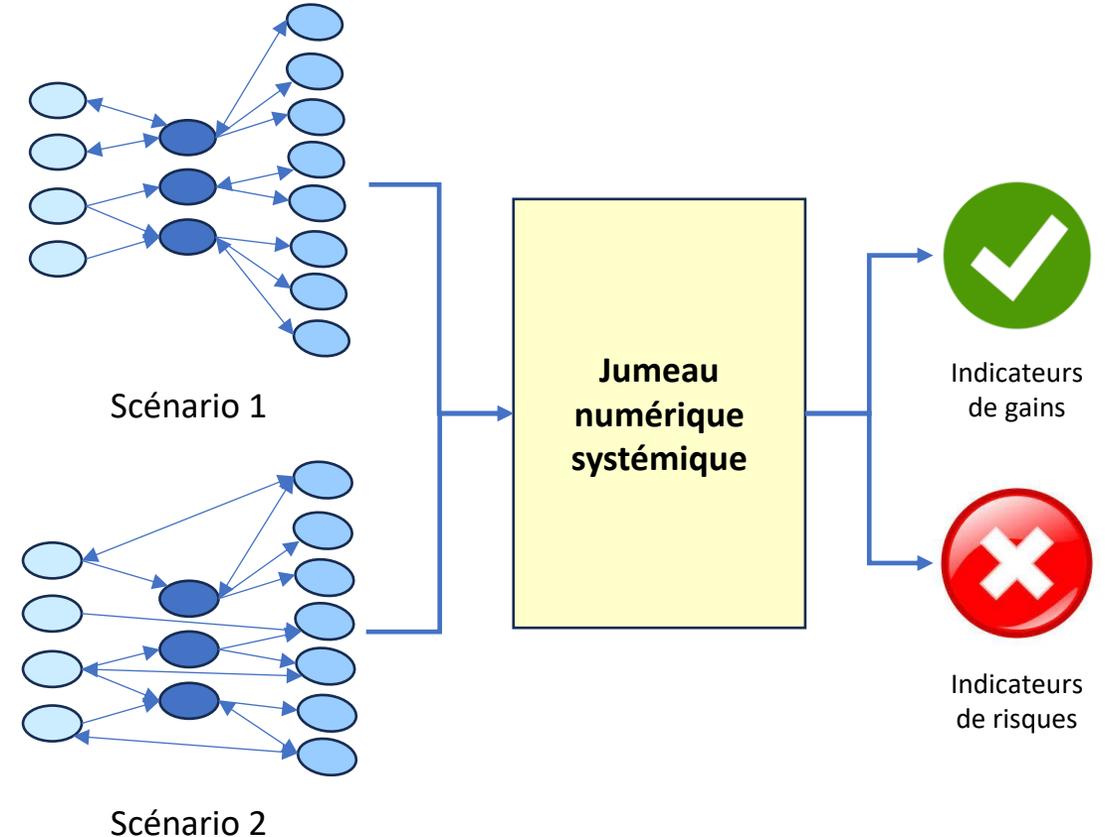
- 1) le **WorldLab™ Workshop** est un atelier de modélisation & simulation systémique où un **ingénieur expert** peut modéliser un système industriel avec notre langage de spécification systémique Σ^{TM} et développer le jumeau numérique systémique associé,
- 2) le **WorldLab™ Player**, généré avec le WorldLab™ Workshop, est l'interface d'expérimentation dédiée aux **utilisateurs métiers** où ces derniers peuvent simuler un système industriel, évaluer des indicateurs métiers et comparer des scénarios industriels.



Comment : le laboratoire d'expérimentation virtuelle WorldLab™ (2/3)



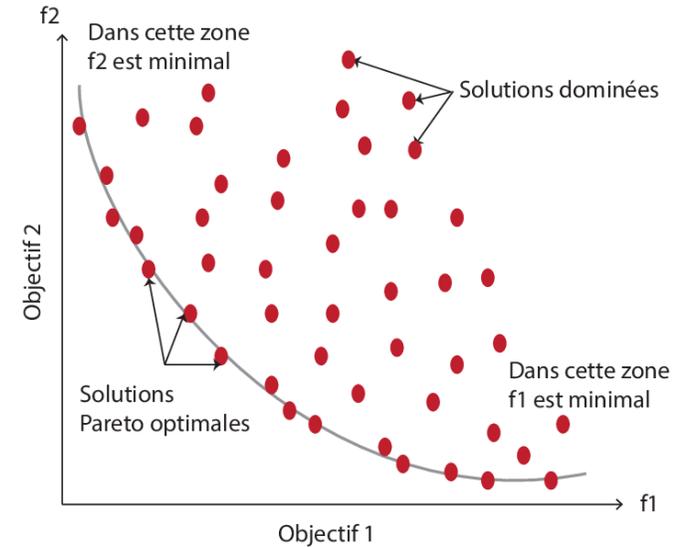
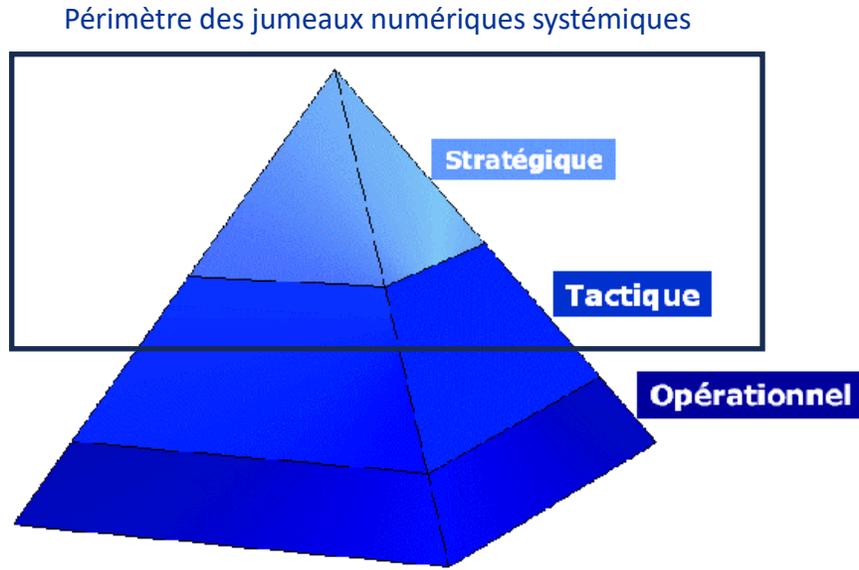
- Un **scénario d'architecture industrielle** est typiquement la donnée de :
 1. un **réseau industriel**, qui est formé d'une part de nœuds industriels (sites de production industrielle, sites de maintenance, sites de stockage, etc.) et d'autre part de relations entre ces nœuds industriels modélisant les différents mécanismes et canaux de transport.
 2. des **flux industriels**, décrivant la nature et les caractéristiques métiers des flux échangés entre les nœuds du réseau industriel,chacun des éléments constitutifs d'une architecture industrielle pouvant être **variable** et défini à l'aide de **paramètres spécifiques**.



Un **jumeau numérique systémique** permet de **comparer différents scénarios d'architecture industrielle** pour identifier le « meilleur » par rapport à des indicateurs métiers prédéfinis



Comment : le laboratoire d'expérimentation virtuelle WorldLab™ (3/3)

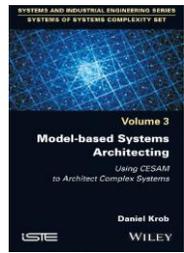
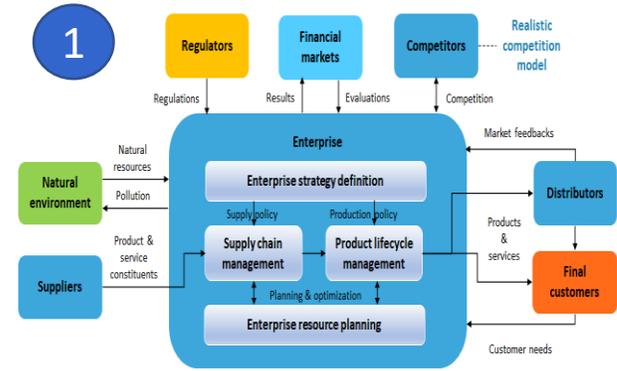


Les jumeaux numériques systémiques sont des **outils complémentaires** aux techniques de recherche opérationnelle :

1. Un **jumeau numérique systémique** a vocation à ne supporter que de la **modélisation à gros / moyen grain**, son but étant d'aider à détourner les solutions d'une problématique d'organisation industrielle au sein de l'espace des possibles. Si l'on veut obtenir une solution fine, il faut compléter l'approche par des approches classiques de recherche opérationnelle centrées sur le périmètre détourné.
2. Par ailleurs, on peut aussi utiliser un jumeau numérique systémique comme une boîte noire permettant d'évaluer une configuration donnée d'une infrastructure industrielle : en couplant jumeaux numériques systémiques et **techniques classiques d'optimisation multi-critères**, on peut alors identifier le **front de Pareto** d'une problématique d'optimisation multi-critères.



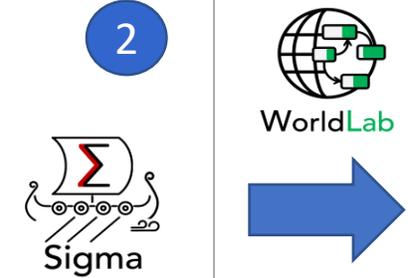
En pratique : comment développer un jumeau numérique systémique ?



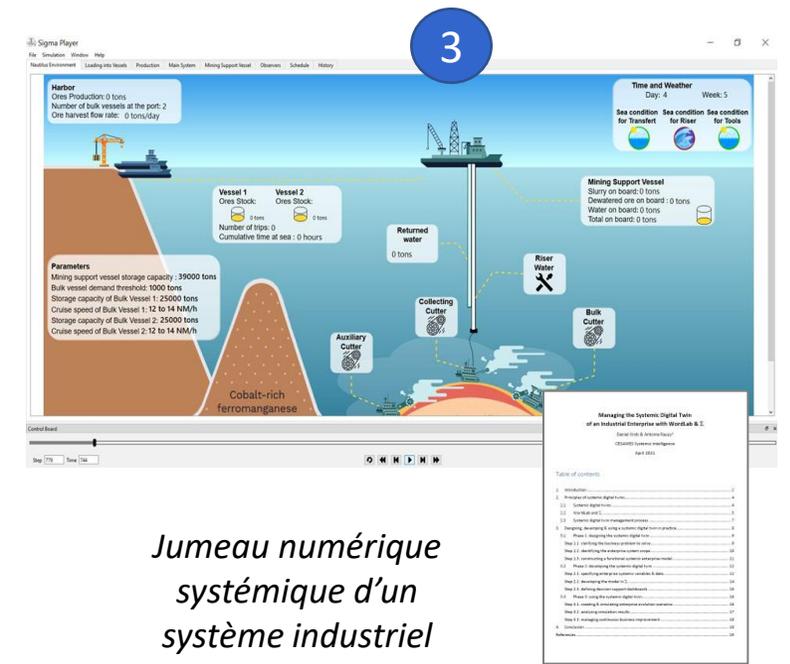
Modèle descriptif d'un système industriel (MBSE)

```

1 system World
2   system Supplier ... end
3   system Producer ... end
4   system Consumer ... end
5 end
6
7 system World.Supplier
8   int rawMaterial (init = 0);
9 end
10
11 system World.Producer
12   int order (init = 0);
13   int rawMaterial (init = 0);
14   int product (init = 0);
15 end
16
17 system World.Consumer
18   int product (init = 0);
19 end
  
```



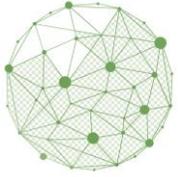
Modèle de simulation en Σ^{TM} d'un système industriel



Jumeau numérique systémique d'un système industriel

Principe de développement d'un jumeau numérique systémique d'un système industriel avec Σ^{TM} et WorldLabTM

La **technologie WorldLabTM** permet de **générer automatiquement des jumeaux numériques systémiques** d'un système industriel à partir d'un **modèle descriptif de ce système** décrit dans notre **langage de modélisation elle Σ^{TM}** .



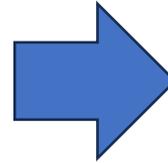
Agenda

1. Systemic Intelligence : qui sommes-nous ?
2. Introduction aux jumeaux numériques systémiques pour l'optimisation des opérations industrielles
- 3. Cas #1 : la transformation des flux logistiques du port de Dunkerque**
4. Cas #2 : la transformation d'un réseau de distribution logistique national



La transformation du port de Dunkerque

Le contexte : une transformation de flux logistiques



Traffic charbon

Traffic conteneurs

En raison de réglementations environnementales, **l'ancien trafic charbon est remplacé par un nouveau trafic conteneurs**, ce qui a un impact considérable sur les infrastructures portuaires puisque le charbon et les conteneurs nécessitent une logistique totalement différente, à savoir la logistique des trains et des camions. Il est donc impératif d'**identifier et sécuriser les investissements** que le port doit réaliser afin de l'adapter au nouveau trafic et de gérer la diminution de l'ancien trafic.



La transformation du port de Dunkerque

Les besoins du Grand Port Maritime de Dunkerque



Terminal à conteneurs du port de Dunkerque

Cas d'utilisation 1 – *Dimensionnement des grues de déchargement du terminal à conteneurs* – L'augmentation du trafic de conteneurs nécessitera l'ajout de nouvelles grues de déchargement au sein du port, ce qui représente un investissement très coûteux qui doit être finement planifié. Combien de nouvelles grues sont nécessaires et quand doivent-elles être mises en service ?

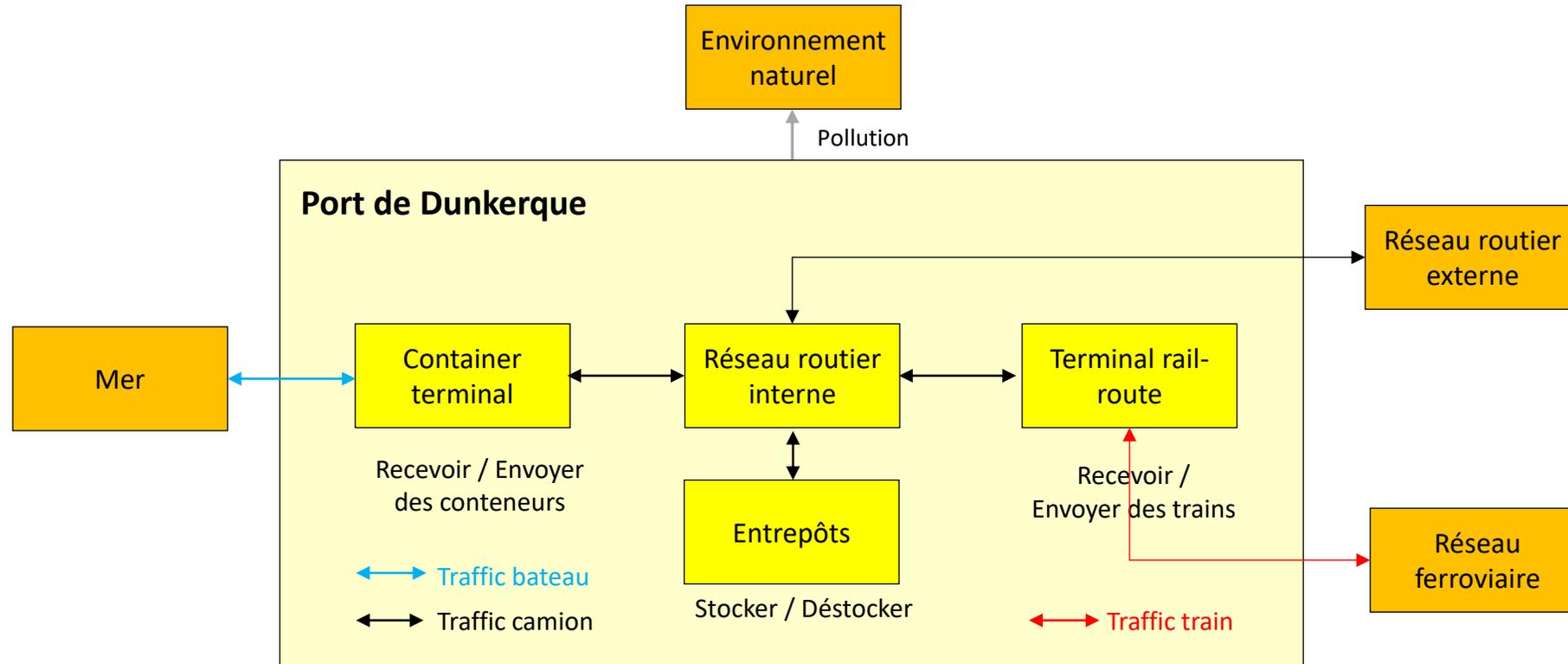
Cas d'utilisation 2 – *Optimisation de l'accès des camions au terminal à conteneurs* – L'augmentation du trafic de conteneurs va augmenter le trafic de camions dans le port. Comment réorganiser la gestion du trafic de camions afin d'optimiser les accès d'entrées / sorties des camions au terminal à conteneurs ?

*Exemples de **cas d'utilisation** liés à la transformation du trafic au sein du port de Dunkerque*

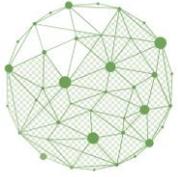


La transformation du port de Dunkerque

Modélisation systémique du Grand Port Maritime de Dunkerque



Modélisation systémique des flux logistiques de conteneurs au sein du port de Dunkerque : on notera que les flux entre les différents systèmes du port peuvent être de types très variés (flux de navires, camions ou trains, voire flux de pollution).



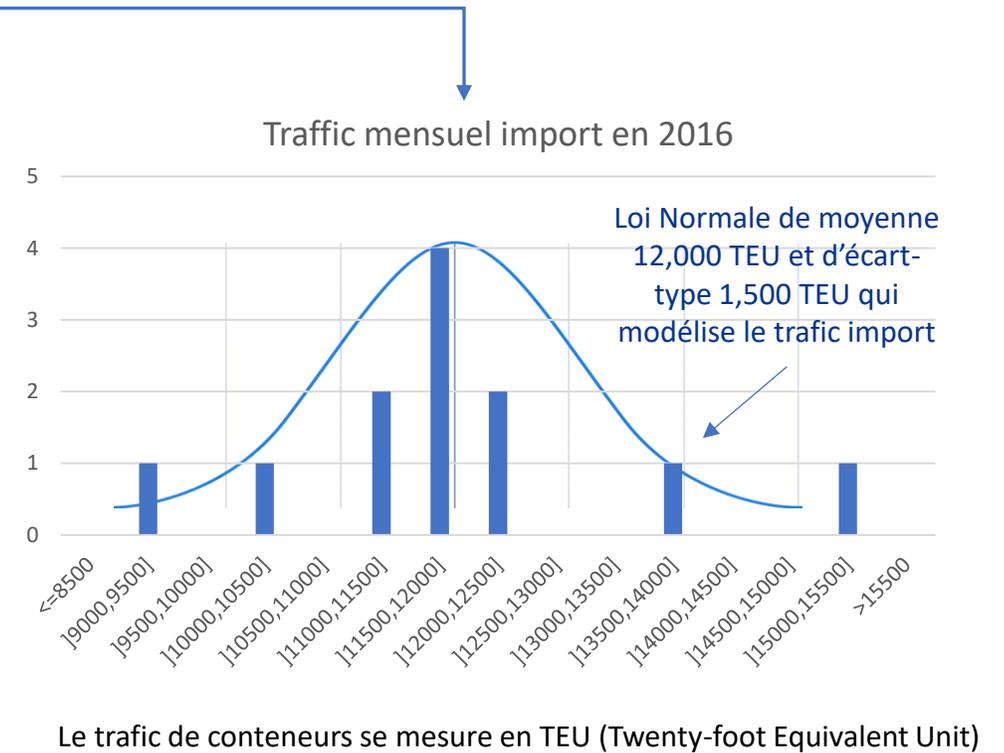
La transformation du port de Dunkerque



Modélisation stochastique des flux logistiques au sein du Grand Port Maritime de Dunkerque

Import	2016	2017	2018	2019	2020	2021
January	12 500	13 750	13 750	16 000	14 000	24 750
February	15 500	12 250	13 250	15 000	16 000	22 250
March	11 500	10 750	14 750	17 500	18 500	15 250
April	11 500	16 250	16 750	17 500	16 000	20 250
May	12 000	13 750	17 250	17 000	18 000	20 250
June	14 000	14 250	15 750	15 500	13 000	20 250
July	12 000	11 250	13 250	19 000	21 000	21 750
August	12 250	15 750	14 750	18 000	14 000	28 250
September	10 500	13 750	13 750	13 000	18 500	18 750
October	12 000	13 750	19 250	17 500	19 000	20 250
November	9 500	12 250	12 750	12 500	20 000	22 250
December	12 000	10 750	12 250	16 500	22 500	24 250
Total	145 250	158 500	177 500	195 000	210 500	258 500
Growth	N/A	9%	12%	10%	8%	23%
Mean	12 000	13 000	15 000	16 500	17 500	21 500
Standard deviation	1500	2000	2000	2000	3000	3500
Mean / standard deviation	8	7	8	8	6	6

Impact de la crise du covid-19



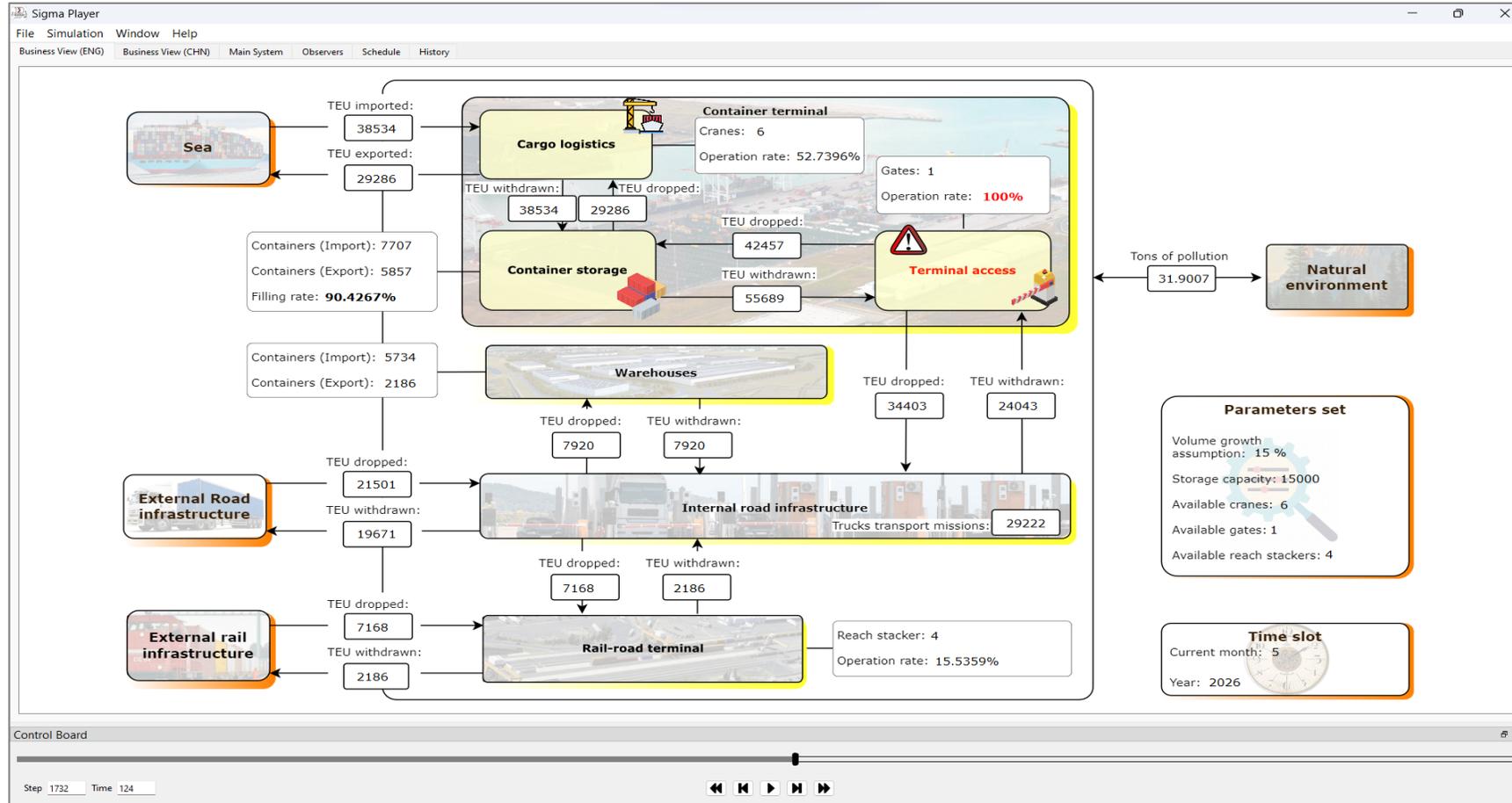
Exemple de **modélisation stochastique** des flux logistiques de conteneurs au sein du port de Dunkerque: l'analyse des données montre que ces derniers, mesurés sur un rythme mensuel, suivent une loi Normale que l'on peut identifier.



La transformation du port de Dunkerque



Développement d'un jumeau numérique systémique pour le Grand Port Maritime de Dunkerque



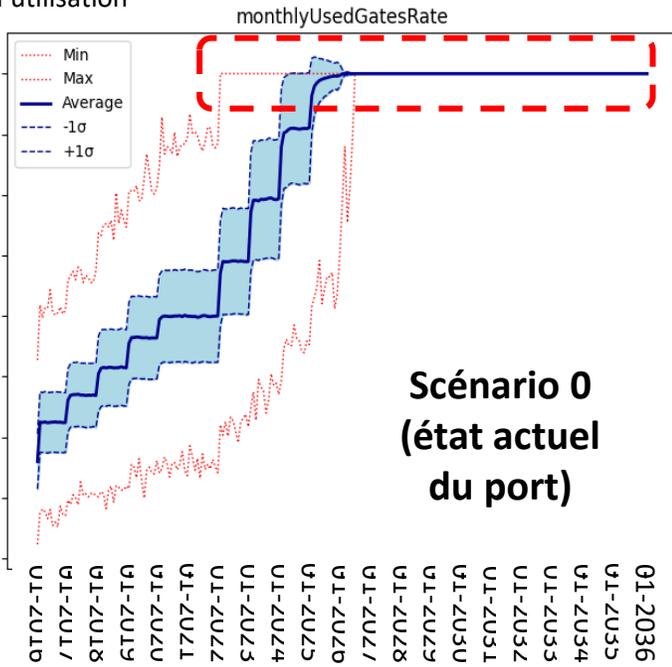
Aide à la décision stratégique : identification des investissements industriels nécessaires pour le trafic conteneurs



La transformation du port de Dunkerque

Calculs d'indicateurs par simulation stochastique pour le Grand Port Maritime de Dunkerque

Taux d'utilisation

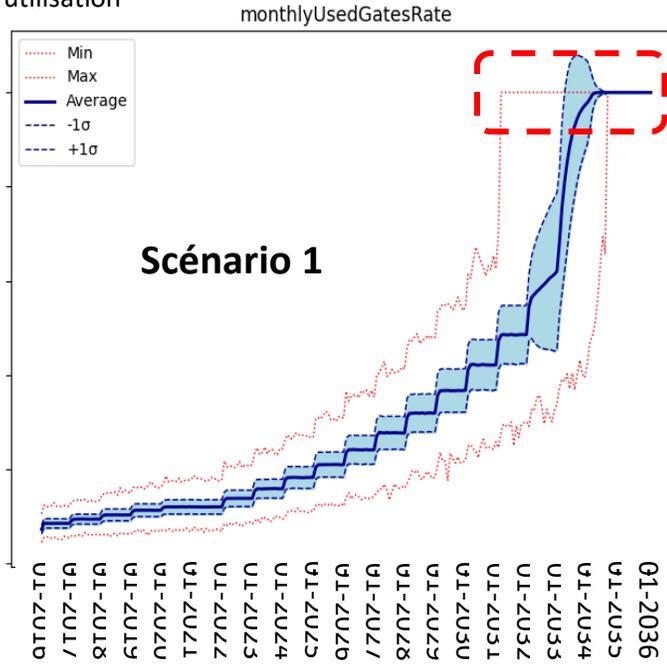


**Scénario 0
(état actuel
du port)**

- 1 zone d'accès pour les camions
- Capacité parc à conteneurs : 60.000 TEU

La saturation de la zone d'accès survient entre 2022 et 2026 dans 100 % des cas

Taux d'utilisation

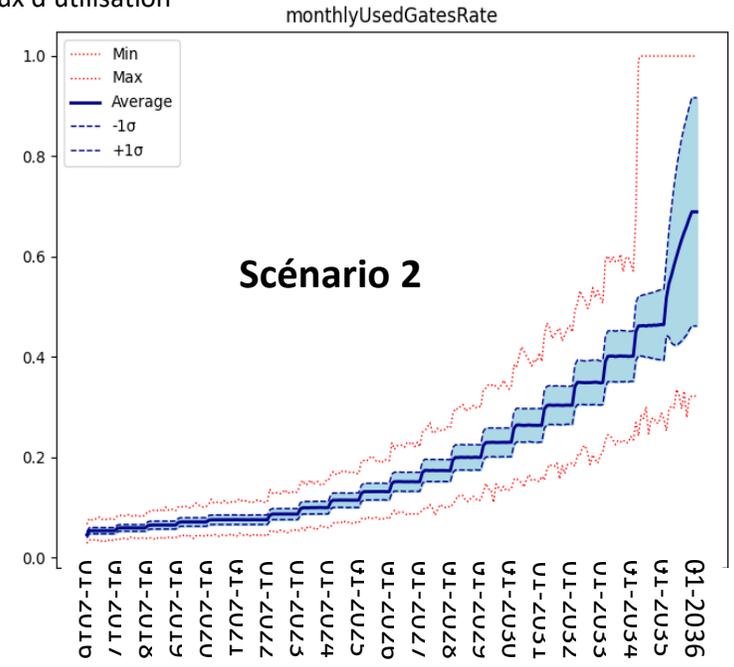


Scénario 1

- 5 zones d'accès pour les camions
- Capacité parc à conteneurs : ≈ 290.000 TEU

La saturation de la zone d'accès survient entre 2031 et 2036 dans 100 % des cas

Taux d'utilisation



Scénario 2

- 8 zones d'accès pour les camions
- Capacité parc à conteneurs : ≈ 460.000 TEU

La saturation de la zone d'accès peut survenir entre 2034 et 2035, mais pour < 15 % des cas

Analyse comparative : comparaison de 3 scénarios d'organisation industrielle d'un parc à conteneurs et de sa zone d'accès pour camions



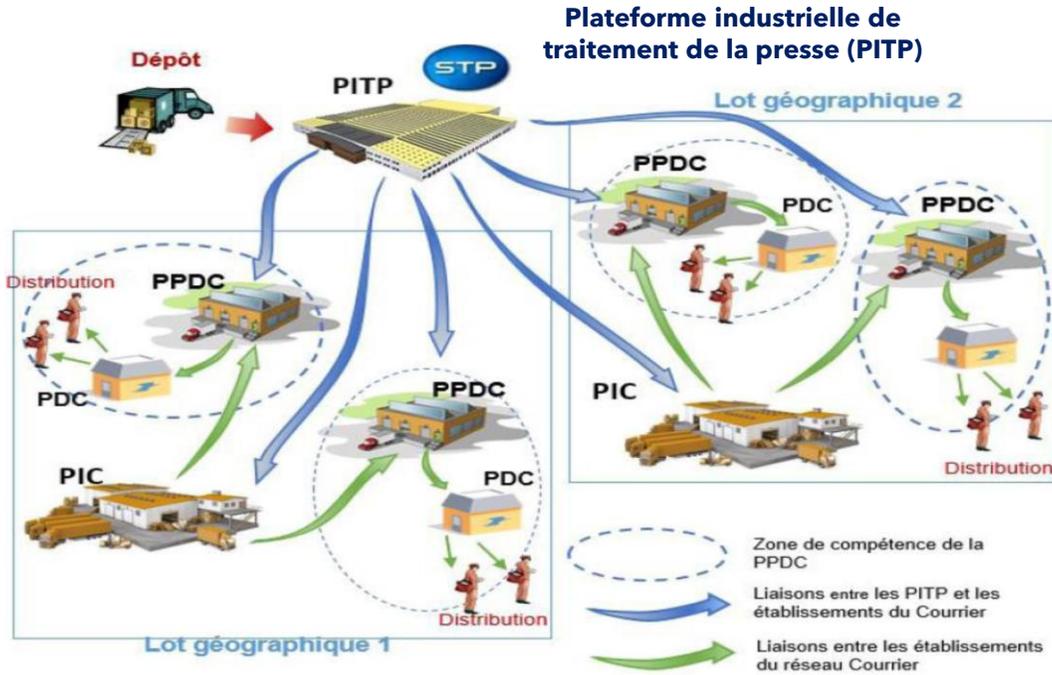
Agenda

1. Systemic Intelligence : qui sommes-nous ?
2. Introduction aux jumeaux numériques systémiques pour l'optimisation des opérations industrielles
3. Cas #1 : la transformation des flux logistiques du port de Dunkerque
- 4. Cas #2 : la transformation d'un réseau de distribution logistique national**



Un enjeu majeur de transformation industrielle

La réorganisation du réseau de distribution de la presse non urgente



Principe d'architecture du réseau de distribution de la presse non urgente

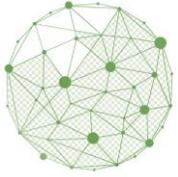


PIC : Plateforme industrielle courrier (Wissous)



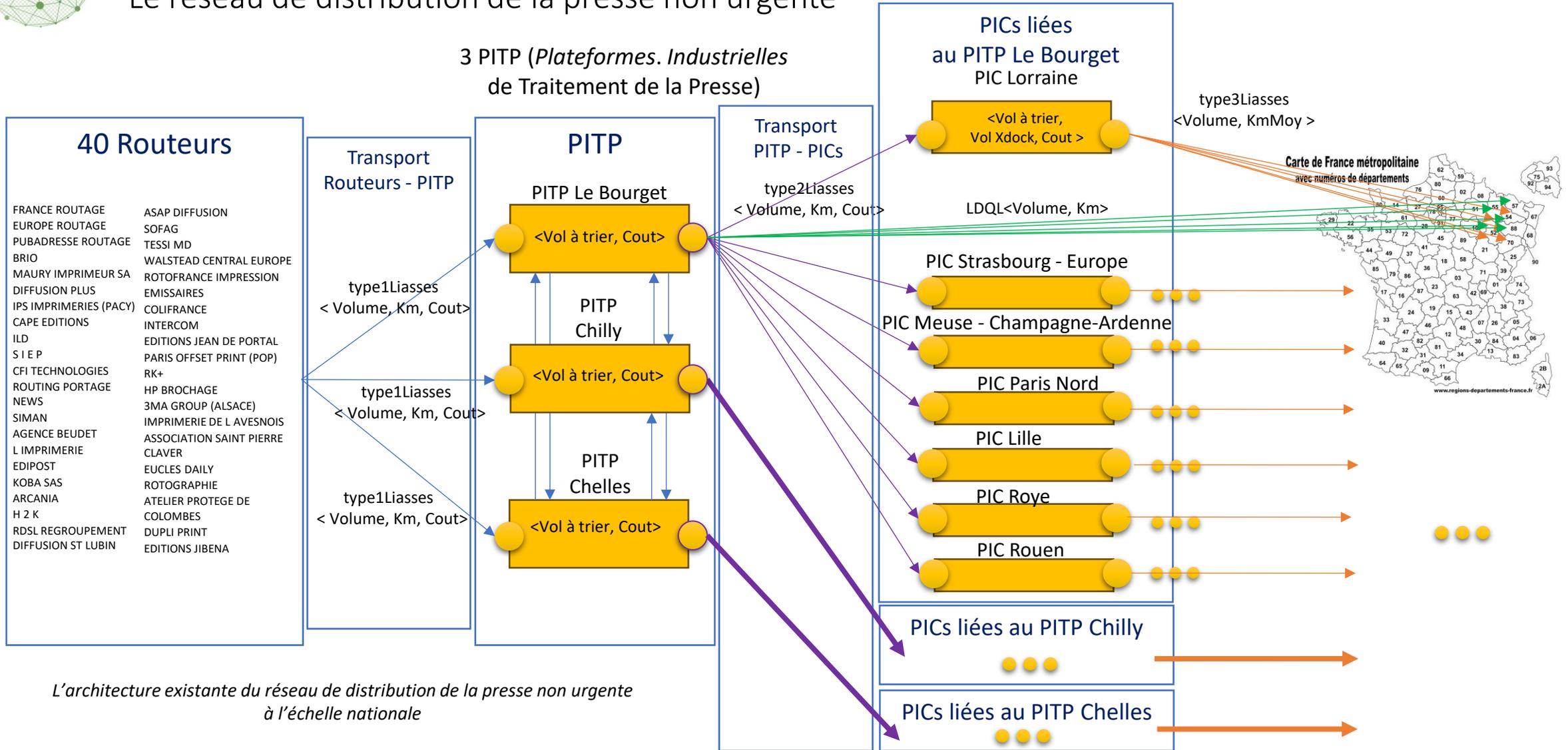
PPDC : Plateforme de préparation et de distribution du courrier (Clermont-Ferrand)

La Poste est un acteur clé de la **distribution de la presse non urgente** en France. La **diminution observée du volume d'expédition de presse** conduit à prévoir de **futures réorganisations industrielles** : il faut donc évaluer l'impact potentiel de ces changements, en particulier pour réévaluer les processus afin d'optimiser l'efficacité opérationnelle et réduire les coûts. Deux axes sont à l'étude : 1) la fermeture progressive de certaines plateformes industrielles de courrier (PIC), 2) la redéfinition de l'offre de préparation entre les routeurs et La Poste.



Le système d'intérêt

Le réseau de distribution de la presse non urgente





Le jumeau numérique systémique développé pour La Poste

Le jumeau numérique systémique du réseau de distribution de la presse non urgente (1/2)



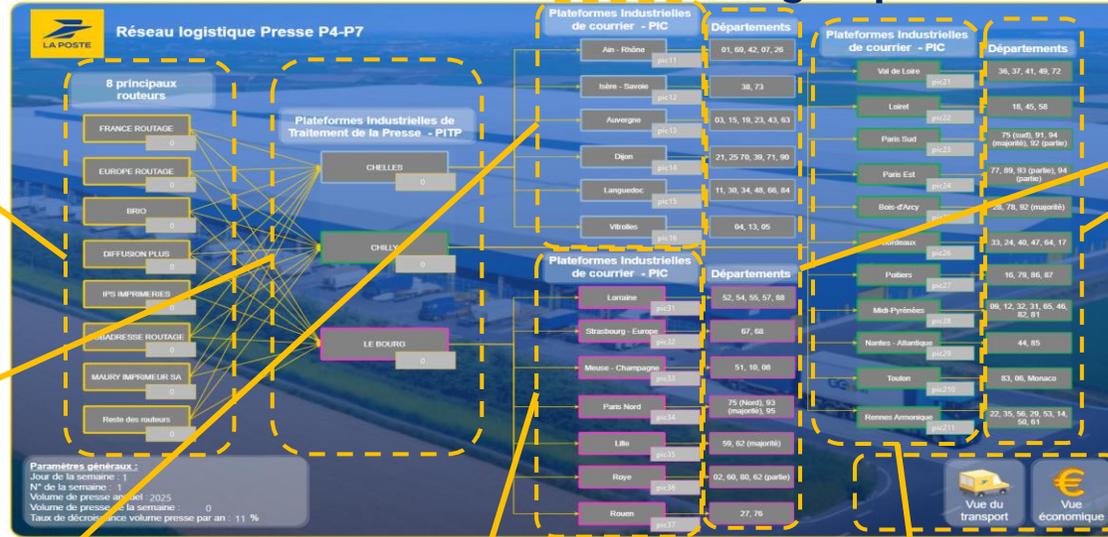
Vues de l'infrastructure du réseau logistique



Vue sur les routeurs



Vue sur les PITP



Vue des départements



Synthèse économique



Synthèse des transports



3 vues sur les PIC



Neuf vues interconnectées sont proposées pour permettre de **comparer différents scénarios d'organisation industrielle caractérisés par une structure donnée de réseau et une allocation donnée de types de flux** par le biais d'une visualisation globale et détaillée des **volumes de presses** et des **indicateurs de distances de transport et de coûts**



Le jumeau numérique systémique développé pour La Poste

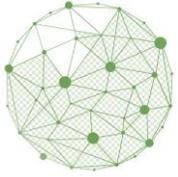
Le jumeau numérique systémique du réseau de distribution de la presse non urgente (2/2)



- **Acquis 1** : le jumeau numérique systémique du réseau de distribution de la presse non urgente est désormais consulté opérationnellement tout au long de l'année par les équipes métiers pour **effectuer des arbitrages** lors des réorganisations régulières de leur périmètre industrielle



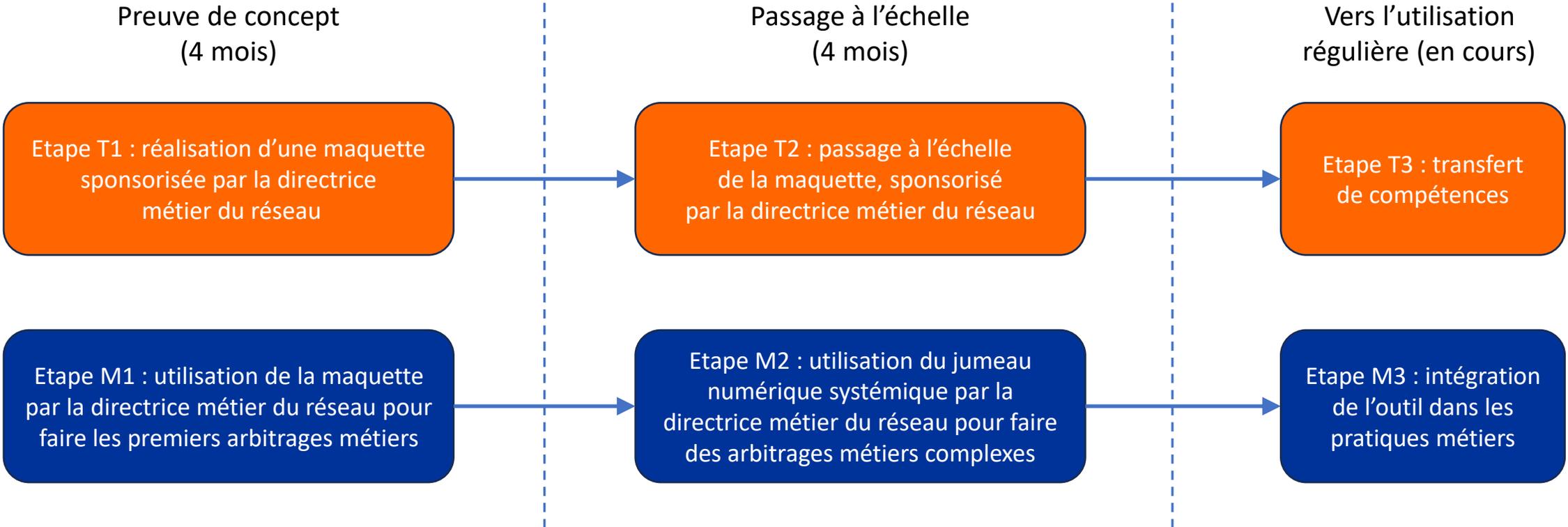
- **Acquis 2** : une **équipe soutien** de quelques personnes a été mise en place par la direction de l'innovation numérique de La Poste (qui dépend de la direction des systèmes d'information) pour aider les équipes métiers à préparer et effectuer leurs activités d'arbitrage industriel



Les étapes clés

Technique

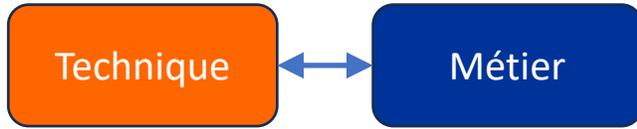
Métier



Le processus de déploiement de notre solution a été organisé en maintenant une **synchronisation permanente** entre des **chantiers techniques** et des **chantiers métiers** consistant à utiliser notre outil – tel qu'il était – au service d'arbitrages métiers complexes réalisés par la sponsor métier de notre mission et à faire monter en maturité notre solution avec ces retours de terrain



Les leçons de ce cas d'industrialisation réussi

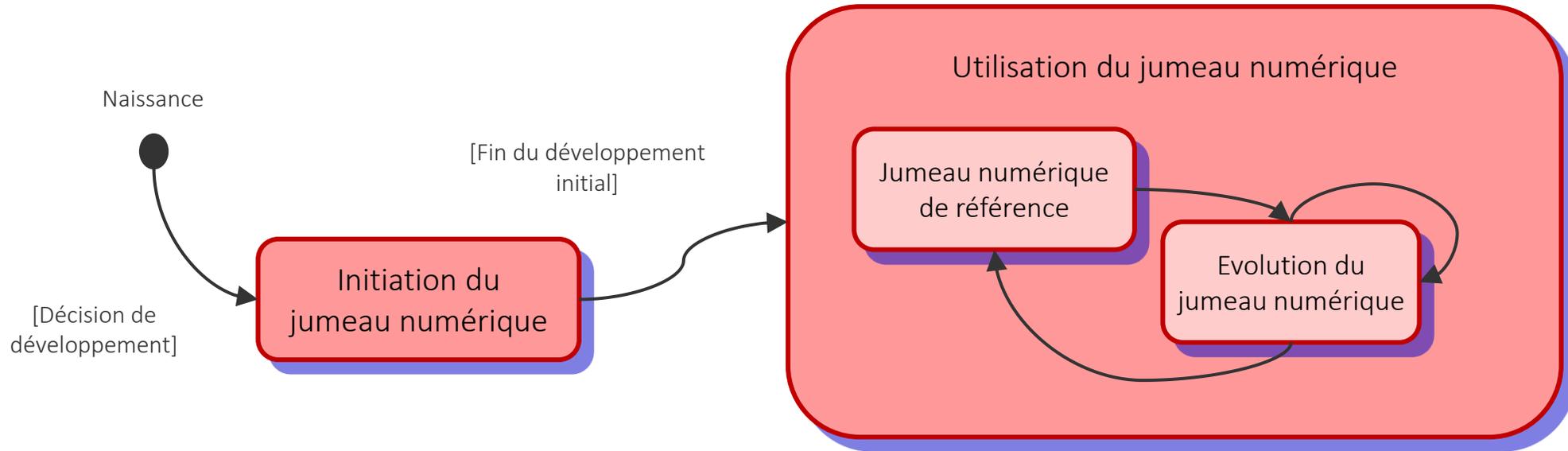


- **Bonne pratique 1** : un **double sponsoring innovation numérique & métier** qui a été installé au tout début du développement de notre solution, celle répondant notamment à un **besoin urgent** de la direction métier concernée
- **Bonne pratique 2** : une **maturation métier & technique synchronisée** permettant de développer une **solution adaptée** aux besoins de la direction métier et **effectivement utilisée** avec succès par cette dernière dès le début
- **Bonne pratique 3** : l'**implication en profondeur** tout au long du processus de développement d'un **petit noyau d'acteurs techniques** de La Poste qui a préfiguré la future équipe technique dédiée à notre solution
- **Bonne pratique 4** : un **travail d'évangélisation « acharné »** de notre sponsor technique, mené à bien en s'appuyant sur les **succès métiers** relativement rapides obtenus par la direction métier concernée



Last, but not least, le rôle central du modèle

La maintenance évolutive est assurée à cout marginal grâce à l'approche Σ^{TM}



Un **jumeau numérique n'est jamais stable** car il doit s'adapter à une réalité mouvante. La réussite de l'industrialisation de notre solution est donc largement due au fait que l'**évolution d'un jumeau numérique** résulte automatiquement de l'**évolution du modèle du système d'intérêt**, ce qui peut se faire à **très faible effort** avec notre solution (de l'ordre de quelques heures à quelques jours selon la complexité de l'évolution à effectuer).

Contact

Daniel KROB

daniel.krob@systemic-intelligence.net

06 60 42 34 49

Systemic Intelligence Group

Société par actions simplifiée au capital de 110.000 €

Siège social : 10, rue de Penthièvre – 75008 Paris – France

Bureaux : c/o Morning – 4-6, rue de Penthièvre – 75008 Paris – France

SIRET : 805 084 670 00035 – APE : 7490B



Systemic
Intelligence