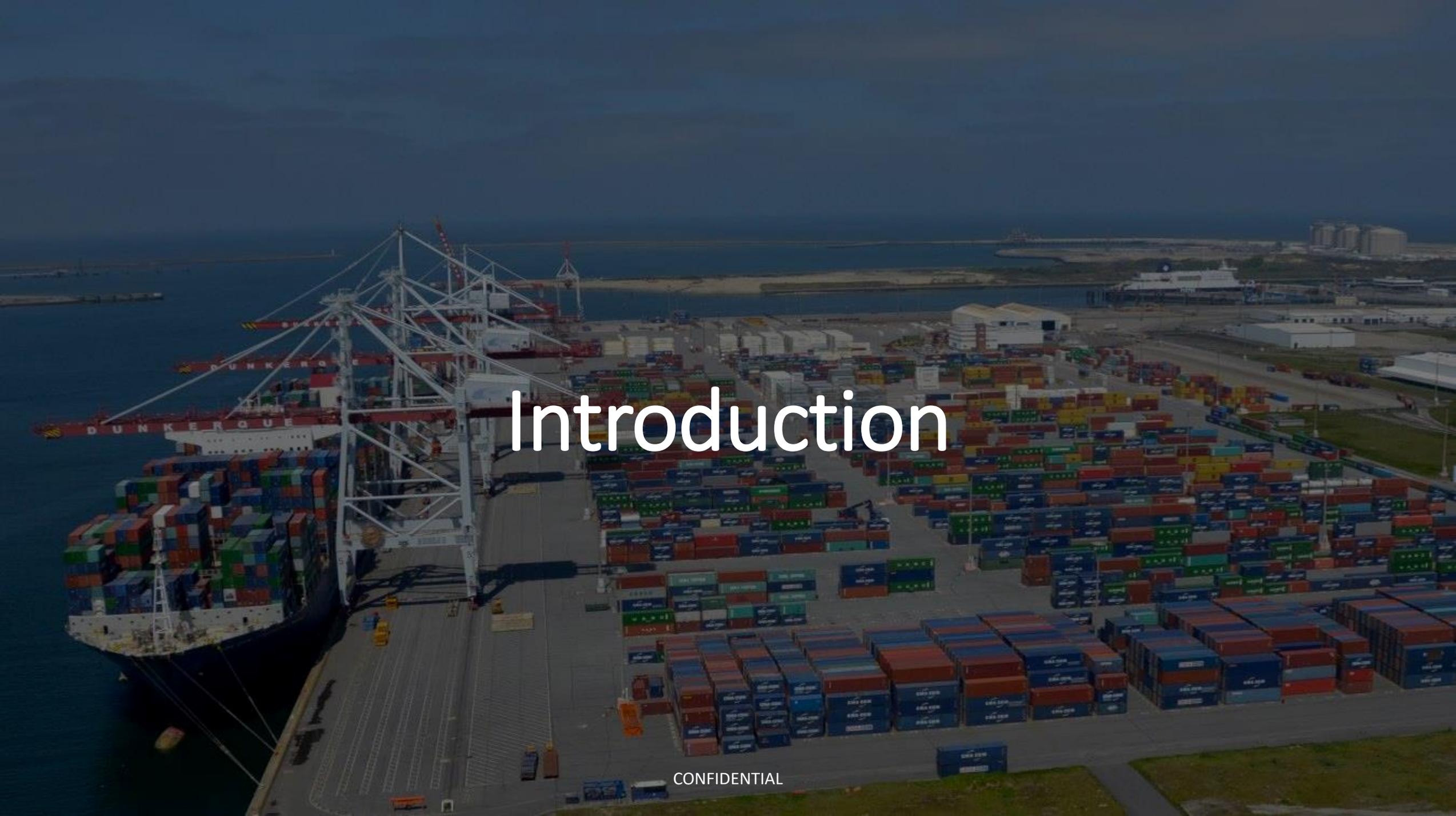


Exemples de besoins industriels

Étude de la montée en puissance de l'activité container du Grand Port Maritime de Dunkerque avec WorldLab



An aerial photograph of a large port facility. On the left, a massive container ship named 'DUNKERQUE' is docked at a pier, its deck stacked high with multi-colored shipping containers. A large gantry crane stands at the ship's side. To the right, a vast yard is filled with hundreds of stacks of shipping containers in various colors, including blue, red, green, and yellow. In the background, there are industrial buildings, a body of water, and a clear sky. The word 'Introduction' is overlaid in large white text across the center of the image.

Introduction

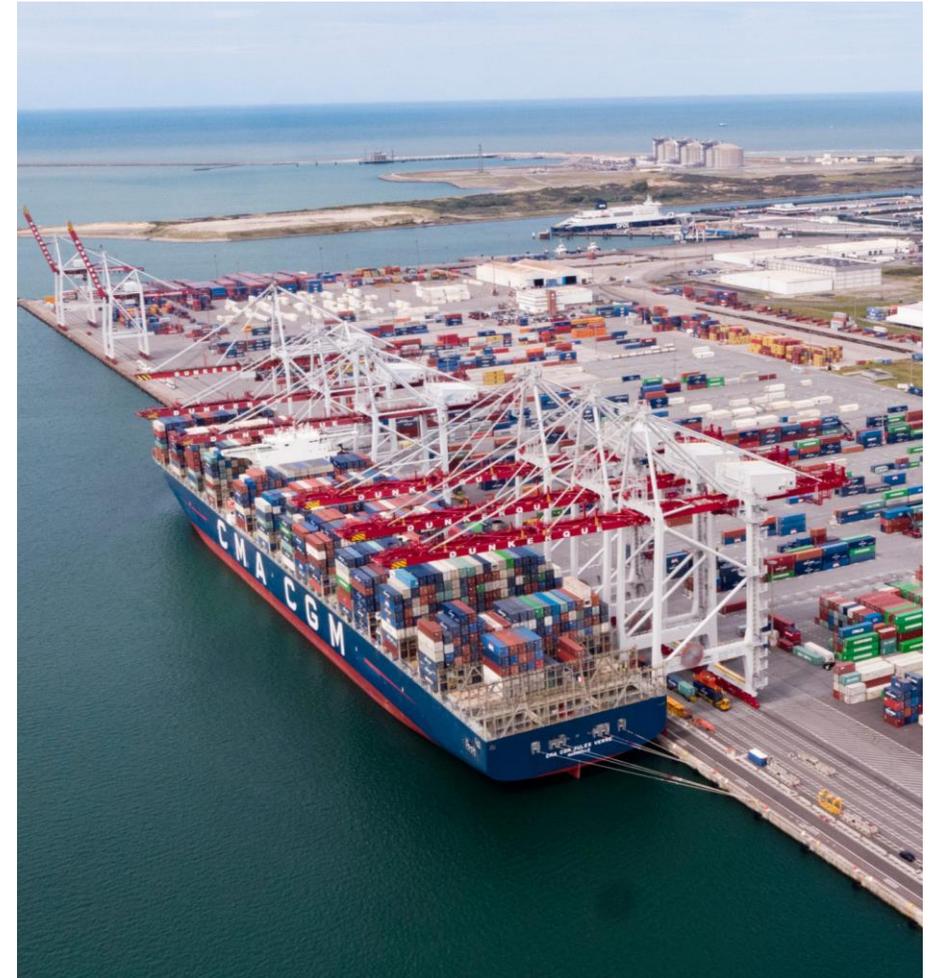
CONFIDENTIAL



Introduction

Contexte

- **GPMD** (Grand Port Maritime de Dunkerque) est le 9ème port du range nord-européen et le **3ème port français**.
- Forte croissance des **activités containers** prévue dans les 10 prochaines années (x2 en 2035)
- Mise en place de plans ambitieux de **renforcement des installations portuaires** et logistiques.
- **Besoins** pour GPMD:
 - Pouvoir évaluer la **résilience** des installations portuaires (état actuel et à devenir)
 - Mieux appréhender les **impacts** sociaux, économiques et environnementaux
- Montage d'un partenariat avec **Systemic Intelligence** pour prototyper une solution de **jumeau numérique systémique** du Port Ouest.





Introduction

WorldLab™ & Σ™ en 30 secondes



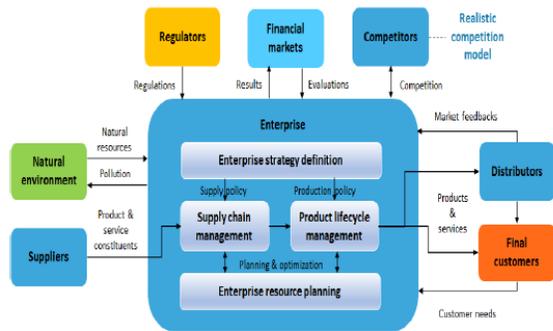
Enterprise / Systems Architect



Model Engineering Specialist



Business User

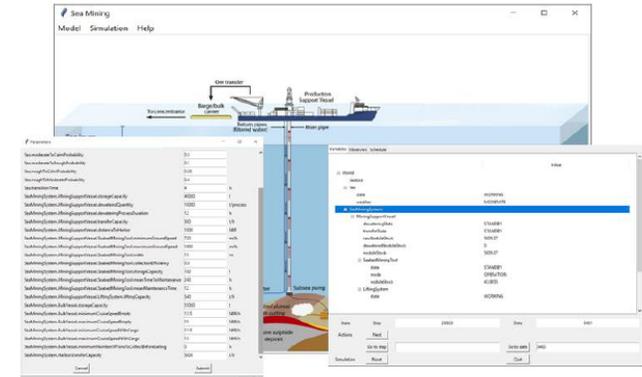
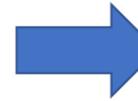


Enterprise informal model

```

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

```



Enterprise systemic digital twin

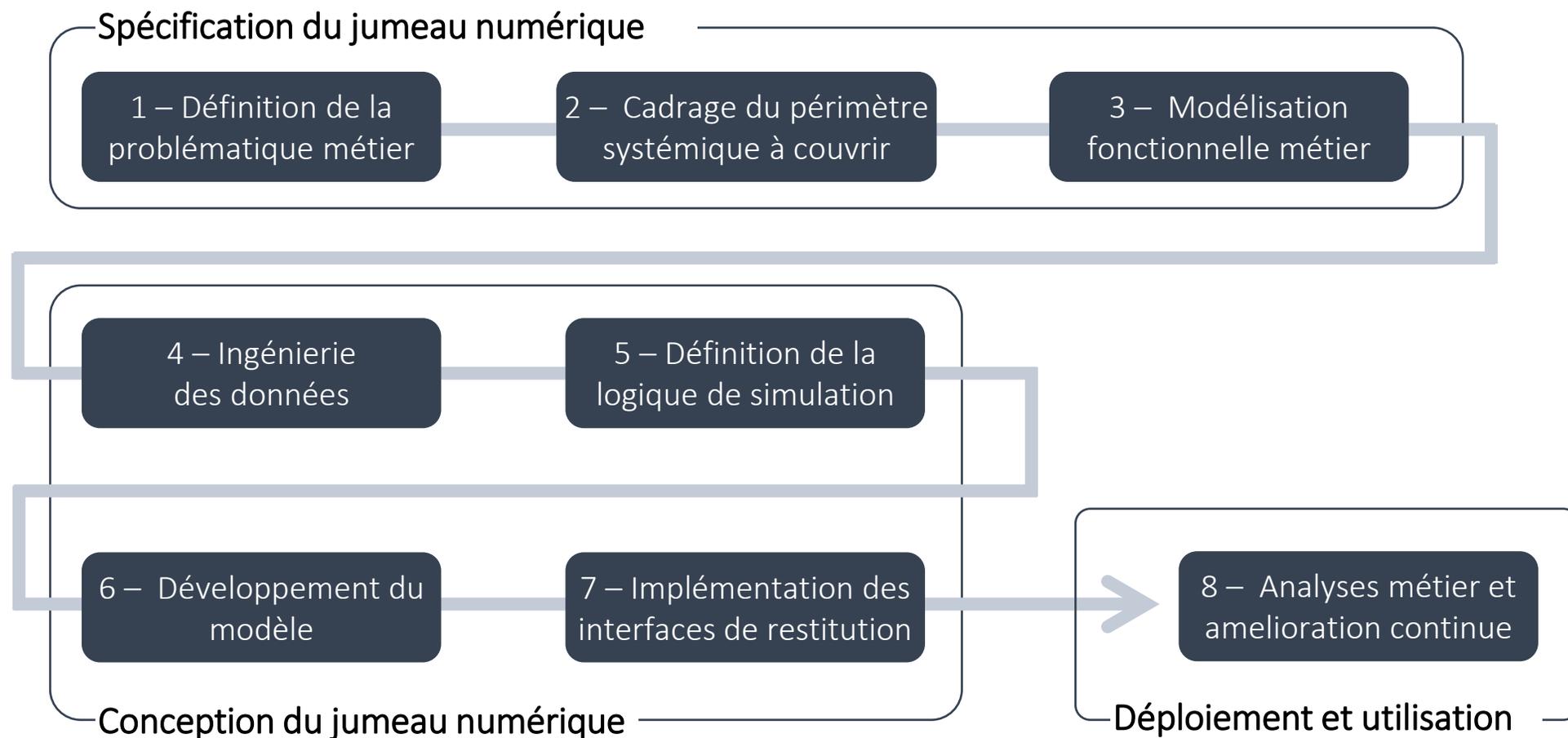
- WorldLab™ est un produit en cours de développement par *Systemic Intelligence*
- Il permet à des spécialistes de la modélisation de créer des **jumeaux numériques systémiques***
- Cette création est automatique, réalisée à partir d'une **spécification de haut niveau** conçue dans notre **langage formel de modélisation Σ™** sur la base d'un modèle informel du système d'intérêt.
- Ces jumeaux numériques systémiques sont ensuite rendus accessibles aux utilisateurs métiers via une **interface**, afin d'être utilisés dans des processus décisionnels.

* ie. basés sur des représentations comportementales abstraites du système réel



Introduction

Grandes étapes de la collaboration GPMD / Systemic Intelligence



Dans le cas de cette étude, l'approche suivie pour la mise à disposition d'un prototype de jumeau numérique systémique s'est articulée autour de **3 grandes phases**.



Phase 1 : Spécification du jumeau numérique

CONFIDENTIAL

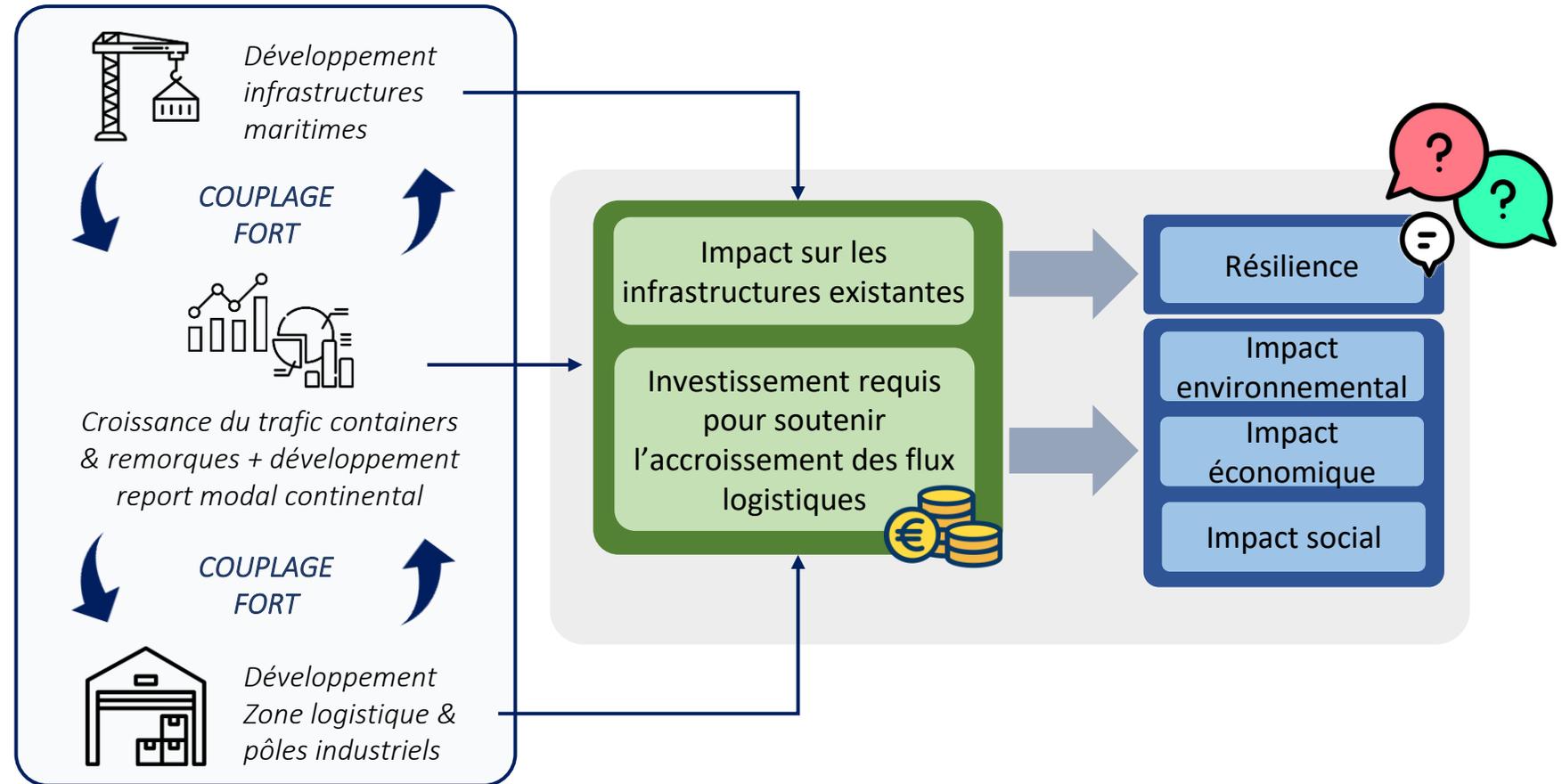


Spécification du jumeau numérique

Définition de la problématique à résoudre : formalisation



Port Ouest du Grand Port Maritime de Dunkerque

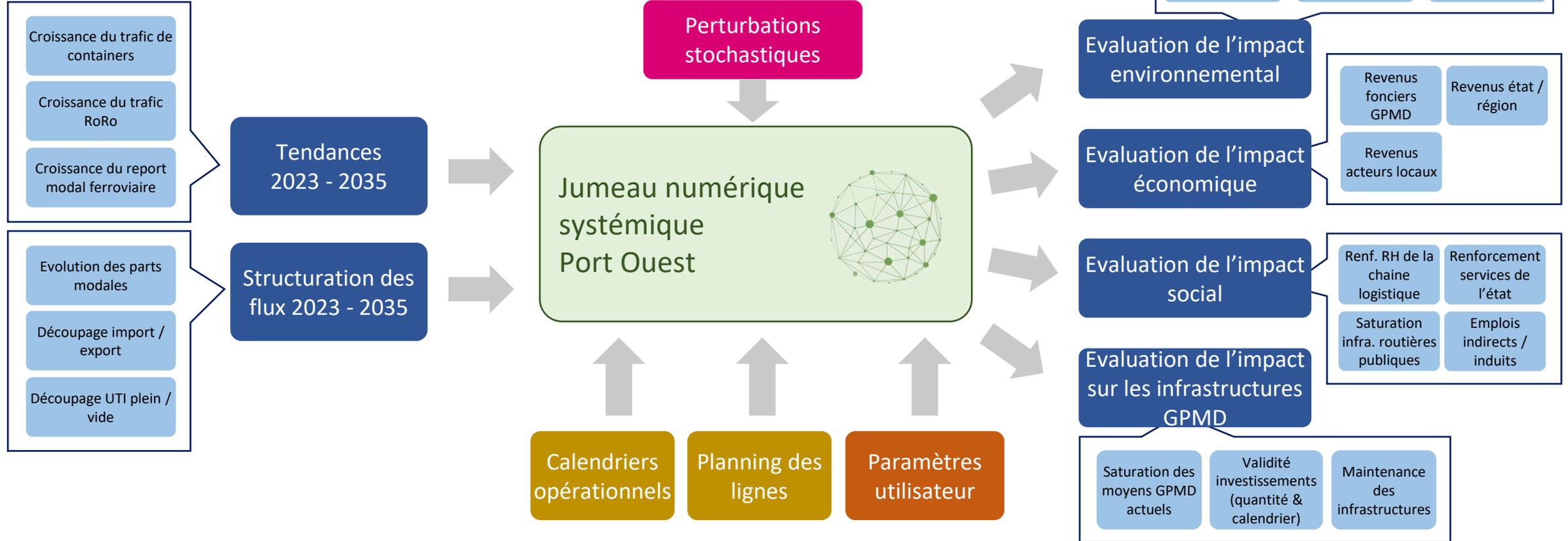


Etudier les impacts des projets de développement du Port Ouest, revient à étudier les impacts de l'évolution des flux logistiques au travers de celui-ci. Il n'est pas possible de se limiter à un secteur en particulier. **Il faut adopter une approche systémique et considérer le port ouest dans sa globalité, ainsi que ses externalités**



Spécification du jumeau numérique

Définition de la problématique à résoudre : chaîne de valeur



- Le jumeau numérique est **alimenté par les flux logistiques d'entrée / sortie** du terminal à container.
- Les **questions que les utilisateurs doivent être capable de traiter** grâce au jumeau numérique sont regroupées en 4 grandes catégories
- Les simulations doivent être paramétrables, sans devoir modifier et recompiler le modèle Σ^{TM}

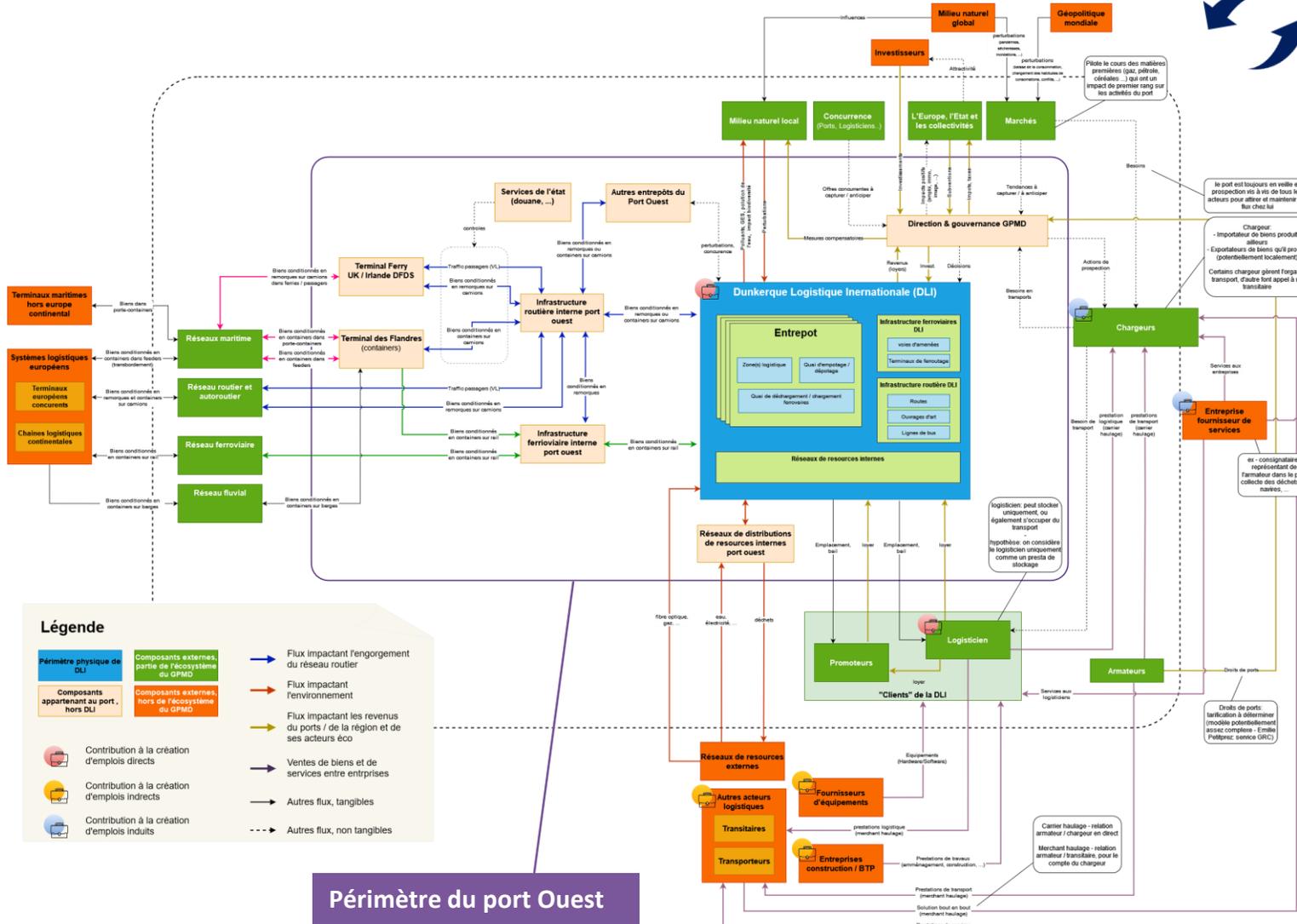


Spécification du jumeau numérique

Cadrage du périmètre systémique à couvrir



Parties prenantes métier GPMD



Périmètre du port Ouest

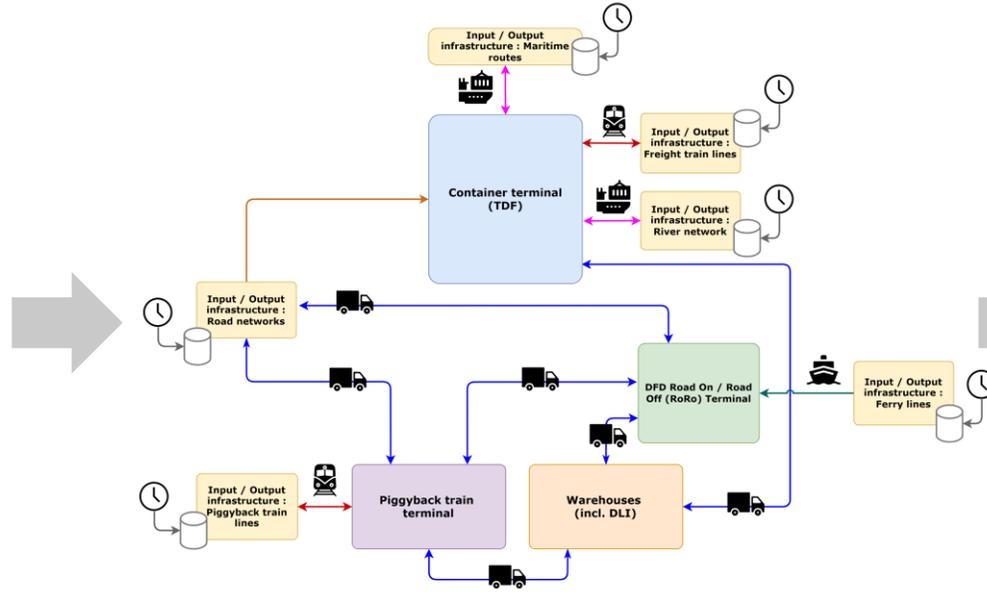
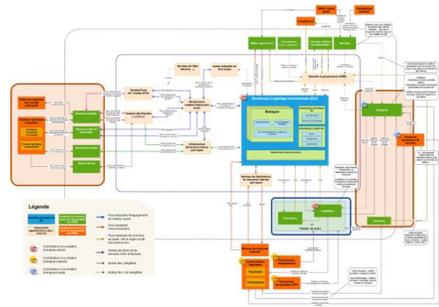
L'analyse systémique de cadrage a permis de définir collaborativement:

- le périmètre et la structure du système d'intérêt (le port ouest, avec ses entrepôts)
- Son environnement (réseaux logistiques, acteurs du transport de marchandises), etc.
- La nature des interfaces au sein du système d'intérêt et avec son environnement

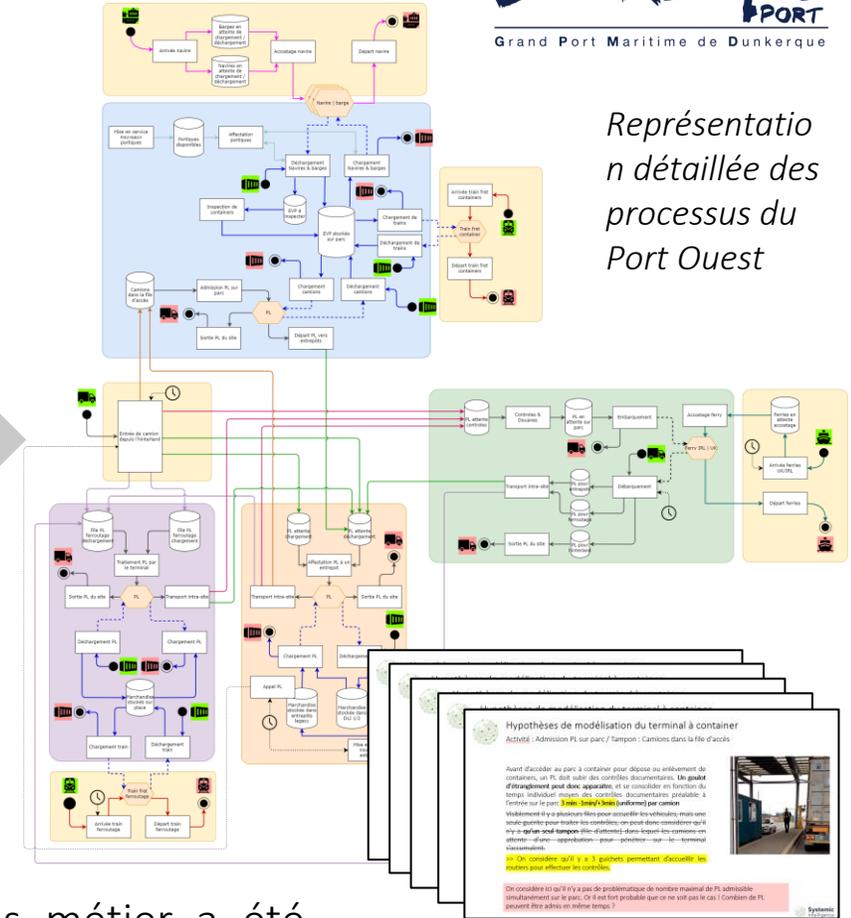


Spécification du jumeau numérique

Modélisation fonctionnelle métier



Représentation macroscopique structurelle



Représentation détaillée des processus du Port Ouest

Sur la base de l'analyse systémique de cadrage, une analyse des processus métier a été réalisée. Celle-ci a permis de faire émerger:

- les **activités logistiques clefs** mises en œuvre par les **sous-systèmes du Port Ouest**
- leurs **caractéristiques intrinsèques** (entrées / sorties / performances / variabilité)
- Les **liens de transfert « d'objets »** logistiques qui existent entre ces activités.

Dossier de spécification des processus métier à modéliser



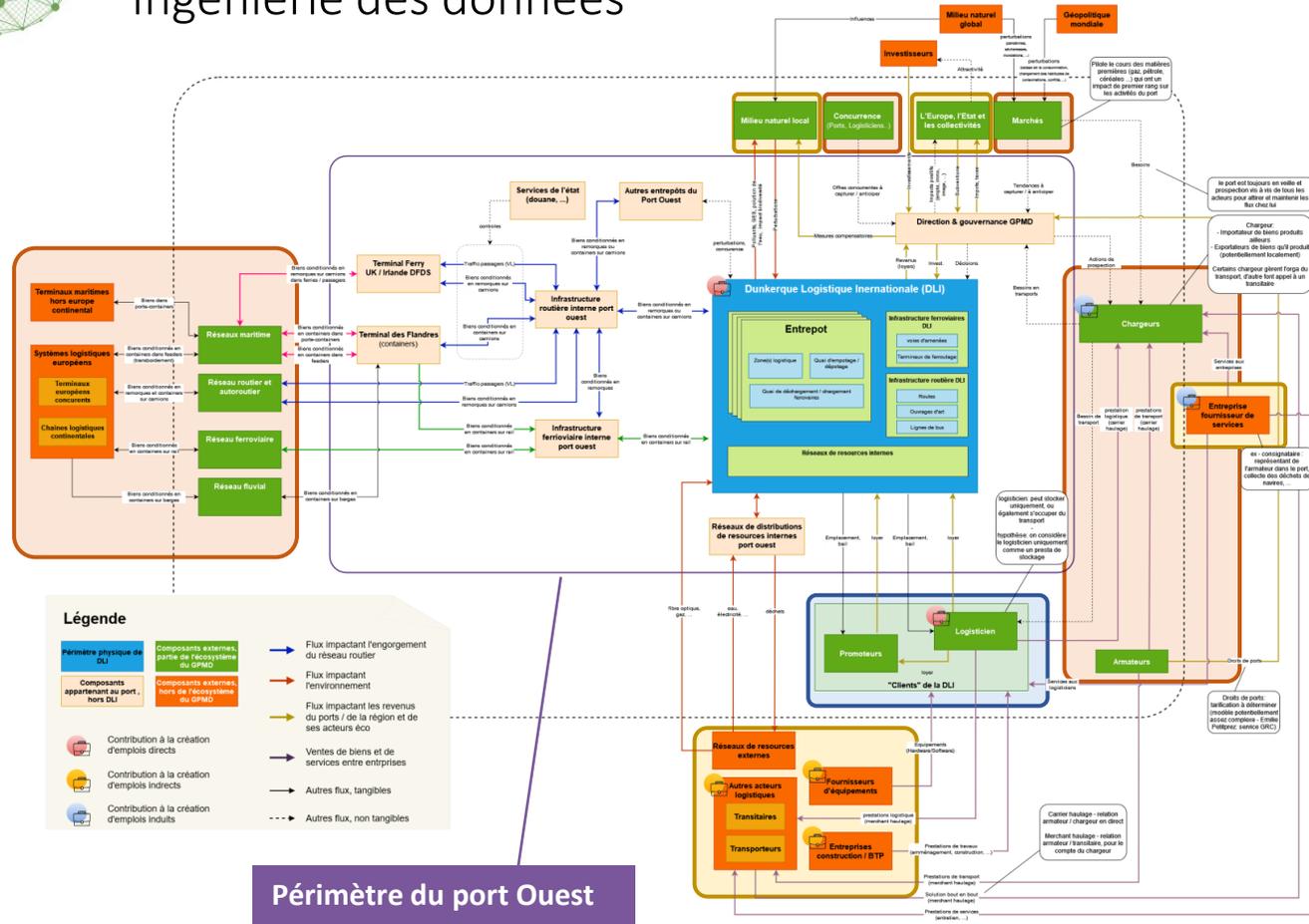
Phase 2 :
Conception du jumeau
numérique

CONFIDENTIAL



Conception du jumeau numérique

Ingénierie des données



Acteurs logistiques externes, pris en compte par les prévisions de croissances du trafic et l'évolution de la structuration des flux logistiques

« Clients » des zones logistiques, pris en compte principalement par les prévisions de montée en puissance des flux de / vers les entrepôts

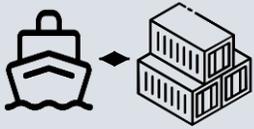
Externalités non modélisées, mais pour lesquels les impacts sont estimés via des indicateurs métiers explicites ou implicites issus du modèle

Le point d'entrée de l'ingénierie des données a été l'analyse de cadrage systémique, qui a permis d'identifier les externalités du port dont la prise en compte devait reposer sur des échanges de données avec le Jumeau Numérique du Port Ouest.

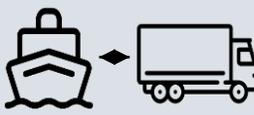


Conception du jumeau numérique

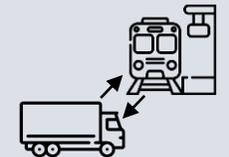
Ingénierie des données



Trafic de containers

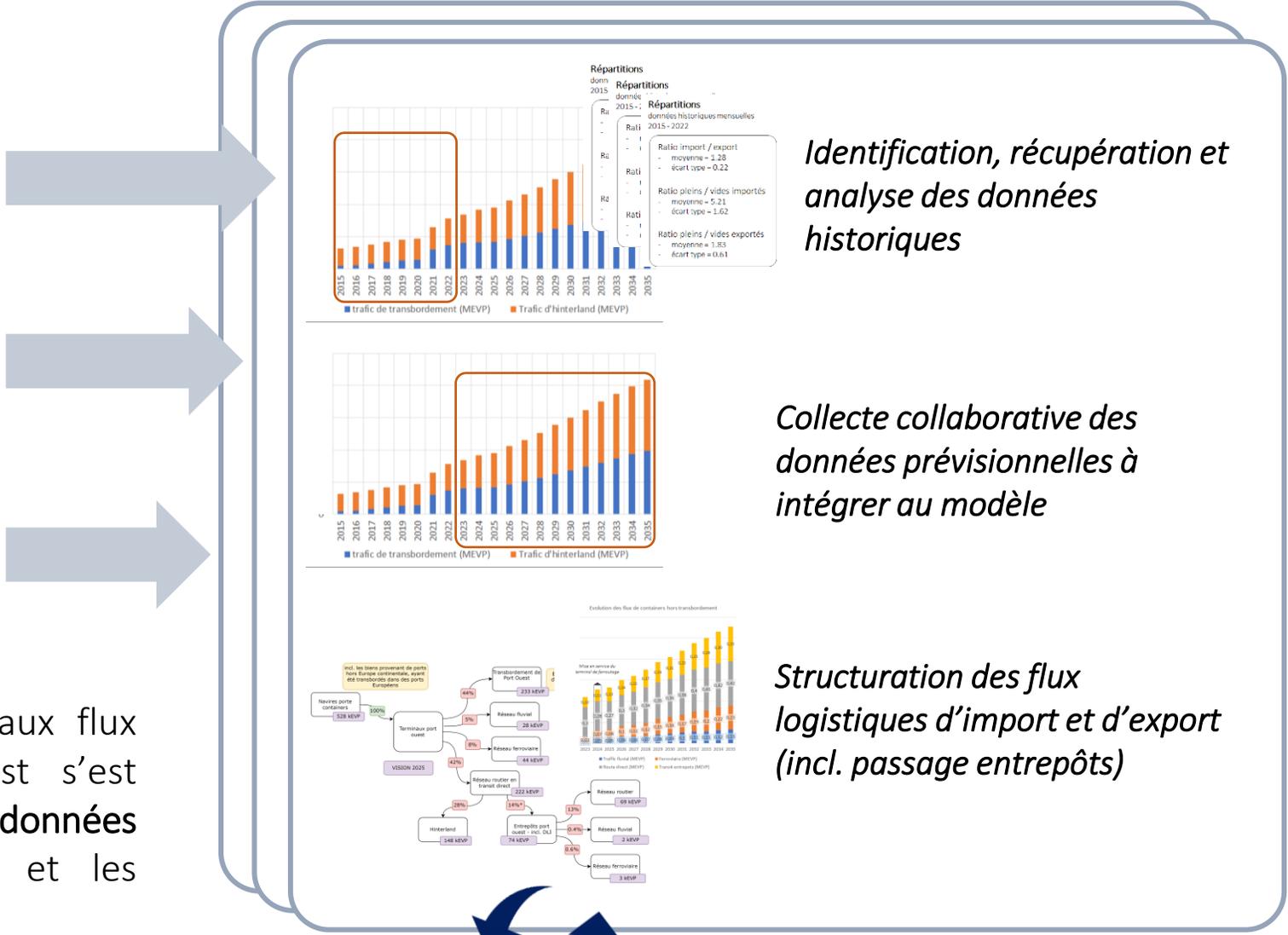


Trafic RoRo



Report modal continental

La compilation des données relatives aux flux logistiques passant par le Port Ouest s'est appuyée sur l'analyse statistiques de **données historiques**, des **études de tendance** et les connaissances des spécialistes du Port.



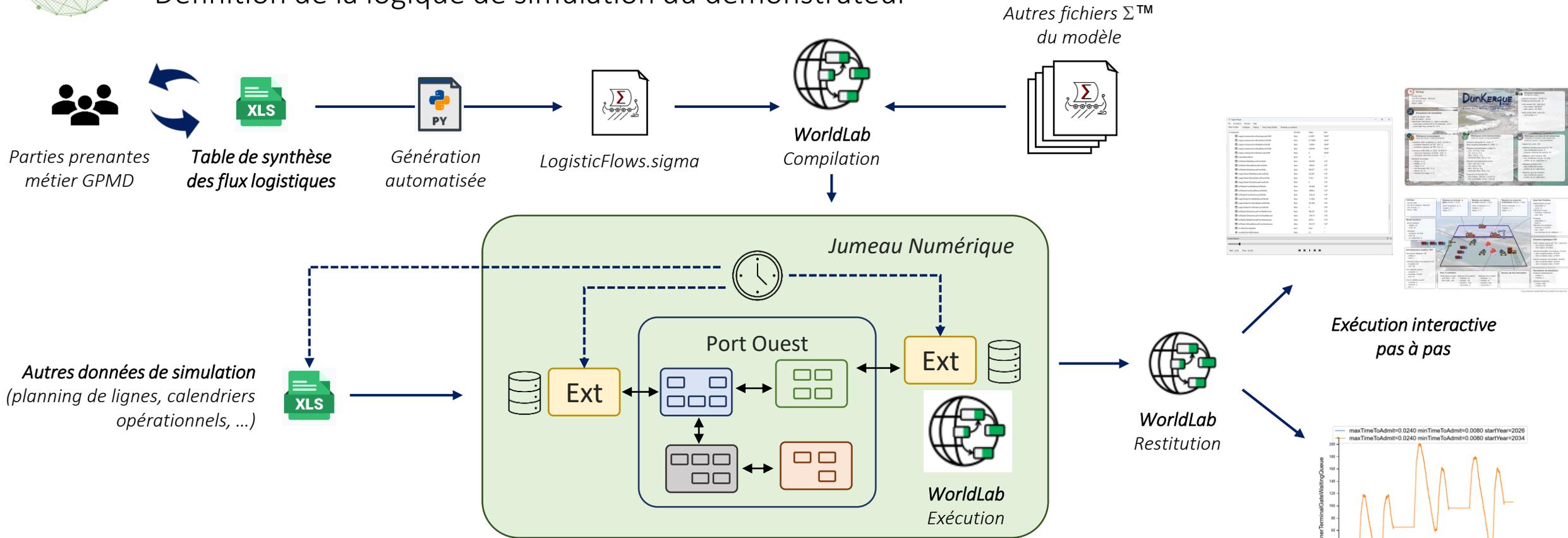
Parties prenantes métier GPMD





Conception du jumeau numérique

Définition de la logique de simulation du démonstrateur



Les **données logistiques** sont intégrées au modèle par **génération automatique** et assignée sélectivement à des variables à l'exécution de celui-ci.

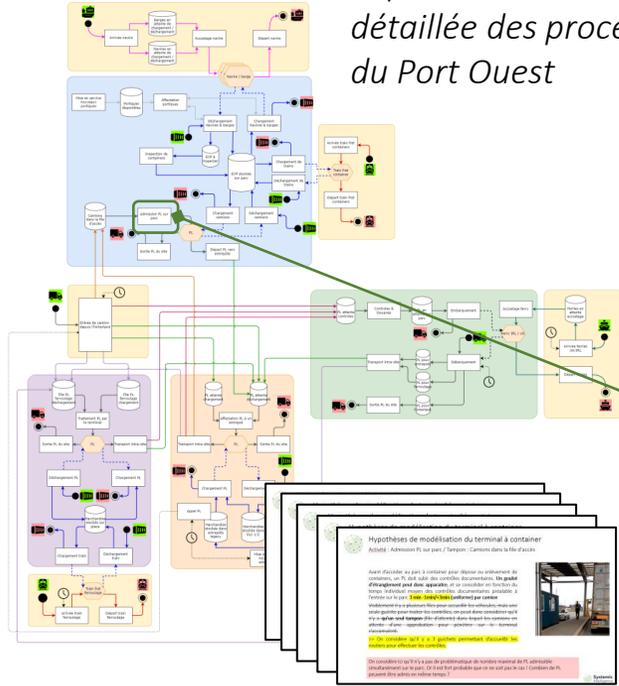
Le comportement de **systèmes externes** est **régi par ces variables** : la logique de simulation consiste à **observer la réponse du Port-Ouest** à ces comportements et à en extraire des **indicateurs métiers**.



Conception du jumeau numérique

Développement du modèle : principes de modélisation comportementale avec Σ^{TM}

Représentation détaillée des processus du Port Ouest



Dossier de spécification des sources de données, activités & buffers impliqués dans le modèle

```

system TruckLogistic
// we consider only trucks that can carry 2 EVPs at the same time
int loadedTrucksExternalWaitingBuffer (init = 0, unit = "2 EVPs loaded truck");
int unloadedTrucksInternalWaitingBuffer (init = 0, unit = "2 EVPs unloaded truck");
int emptyTrucksExternalWaitingBuffer (init = 0, unit = "2 EVPs empty truck");

// we consider only trucks that can carry 2 EVPs at the same time
int loadedTrucksInternalWaitingBuffer (init = 0, unit = "2 EVPs loaded truck");
int unloadedTrucksInternalWaitingBuffer (init = 0, unit = "2 EVPs unloaded truck");
int emptyTrucksInternalWaitingBuffer (init = 0, unit = "2 EVPs empty truck");

float nominalTimeToAdmit (init=2/60, unit="hour");
float minTimeToAdmit (init=nominalTimeToAdmit - 0/60, unit="hour");
float maxTimeToAdmit (init=nominalTimeToAdmit + 2/60, unit="hour");

float nominalTimeToMoveContainer (init=4/60, unit="hour");
float minTimeToMoveContainer (init=nominalTimeToMoveContainer - 0.5/60, unit="hour");
float maxTimeToMoveContainer (init=nominalTimeToMoveContainer + 5/60, unit="hour");

// int openingHoursSpan (init = main.systemClock.closingHour - main.systemClock.openingHour, unit = "hours");
// float monthlyWorkingDaysAverage (init = main.systemClock.closingDay - main.systemClock.openingDay, unit = "days");
// float intensityFactor (init = monthlyWorkingDaysAverage/openingHoursSpan);

int availableGateHouseWorkers (init=2, unit = "available workers");

int loadedTrucksWaitingToExitToInterland (init=0, unit = "truck loaded with full container waiting for departure");
int loadedTrucksWaitingToExitToSeaHouse (init=0, unit = "truck loaded with full container waiting for departure");
int unloadedTrucksWaitingToExitToInterland (init=0, unit = "truck loaded with empty container waiting for departure");
int emptyTrucksWaitingToExit (init=0, unit = "empty truck waiting for departure");

// containers from the parc that are "bumped" so that they can be collected by trucks
int fullContainersBoundForInterlandByTruck (init=0, unit="full containers waiting to be picked up by truck");
int fullContainersBoundForSeaHouseByTruck (init=0, unit="full containers waiting to be picked up by truck");
int emptyContainersBoundForInterlandByTruck (init=0, unit="empty containers waiting to be picked up by truck");

// -----ACTIVITIES-----
// ---- ADMIT TRUCKS ON THE CONTAINER PARC
// --- Loaded trucks
activity admitLoadedTrucksOntoTheContainerPark
trigger :
return availableGateHouseWorkers > 0
and loadedTrucksExternalWaitingBuffer > 0
and main.systemClock.tdfAccessDayTime == "WORKINGHOURS"
and main.systemClock.tdfAccessWeekTime == "WORKINGDAY";
start : {
availableGateHouseWorkers --1;
loadedTrucksExternalWaitingBuffer --1;
}
completion : {
loadedTrucksInternalWaitingBuffer ++1;
availableGateHouseWorkers ++1;
}
duration :
return uniformDeviat (minTimeToAdmit, maxTimeToAdmit);
end

// -----ACTIVITIES-----
// ---- ADMIT TRUCKS ON THE CONTAINER PARC
// --- Loaded trucks
activity admitLoadedTrucksOntoTheContainerPark
trigger :
return availableGateHouseWorkers > 0
and unloadedTrucksExternalWaitingBuffer > 0
and main.systemClock.tdfAccessDayTime == "WORKINGHOURS"
and main.systemClock.tdfAccessWeekTime == "WORKINGDAY";
start : {
availableGateHouseWorkers --1;
unloadedTrucksExternalWaitingBuffer --1;
}
completion : {
unloadedTrucksInternalWaitingBuffer ++1;
availableGateHouseWorkers ++1;
}
duration :
return uniformDeviat (minTimeToAdmit, maxTimeToAdmit);
end

```



```

// -----ACTIVITIES-----
// ---- ADMIT TRUCKS ON THE CONTAINER PARC
// --- Loaded trucks
activity admitLoadedTrucksOntoTheContainerPark
trigger :
return availableGateHouseWorkers > 0
and loadedTrucksExternalWaitingBuffer > 0
and main.systemClock.tdfAccessDayTime == "WORKINGHOURS"
and main.systemClock.tdfAccessWeekTime == "WORKINGDAY";
start : {
availableGateHouseWorkers --1;
loadedTrucksExternalWaitingBuffer --1;
}
completion : {
loadedTrucksInternalWaitingBuffer ++1;
availableGateHouseWorkers ++1;
}
duration :
return uniformDeviat (minTimeToAdmit, maxTimeToAdmit);
end

```

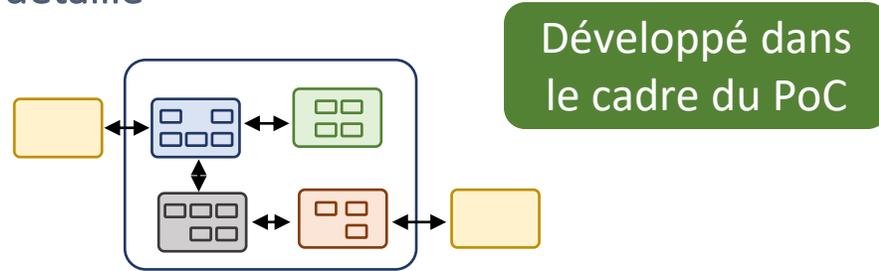
Σ^{TM} permet de réaliser une spécification systémiques formelle à partir d'un modèle informel issu d'un processus d'architecture de systèmes / d'entreprise. Cette spécification permet de produire automatiquement un jumeau numérique grâce à WorldLab.



Conception du jumeau numérique

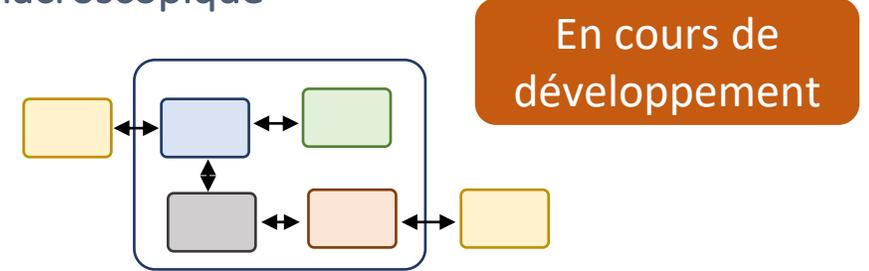
Développement du modèle

Modèle détaillé



- Couteux à simuler - Simule des **temps courts**
- Réalise des « carottages » sur une période d'intérêt
- Identification et compréhension des inefficacités & des goulots d'étranglement
- Utile pour faire des analyses « *what if* »:
 - Evaluation de résilience d'infrastructures
 - Vérification de la validité opérationnelle de certains investissements

Modèle macroscopique



- Rapide à simuler - Simule des **temps longs**
- Calcul d'indicateurs stratégiques de haut niveau avec prise en compte de phénomènes stochastiques
- Facilite l'intégration de nouvelles hypothèses / de nouveaux systèmes
- **Difficulté** : Nécessite l'accès à une grande quantité de données « métiers » (valeur nominales, dispersions, etc.)

Ces deux modèles ont une **structure systémique très similaire** et se distinguent par leurs **niveaux d'abstraction**.

Ils sont complémentaires et permettent de répondre à des **problématiques différentes**.

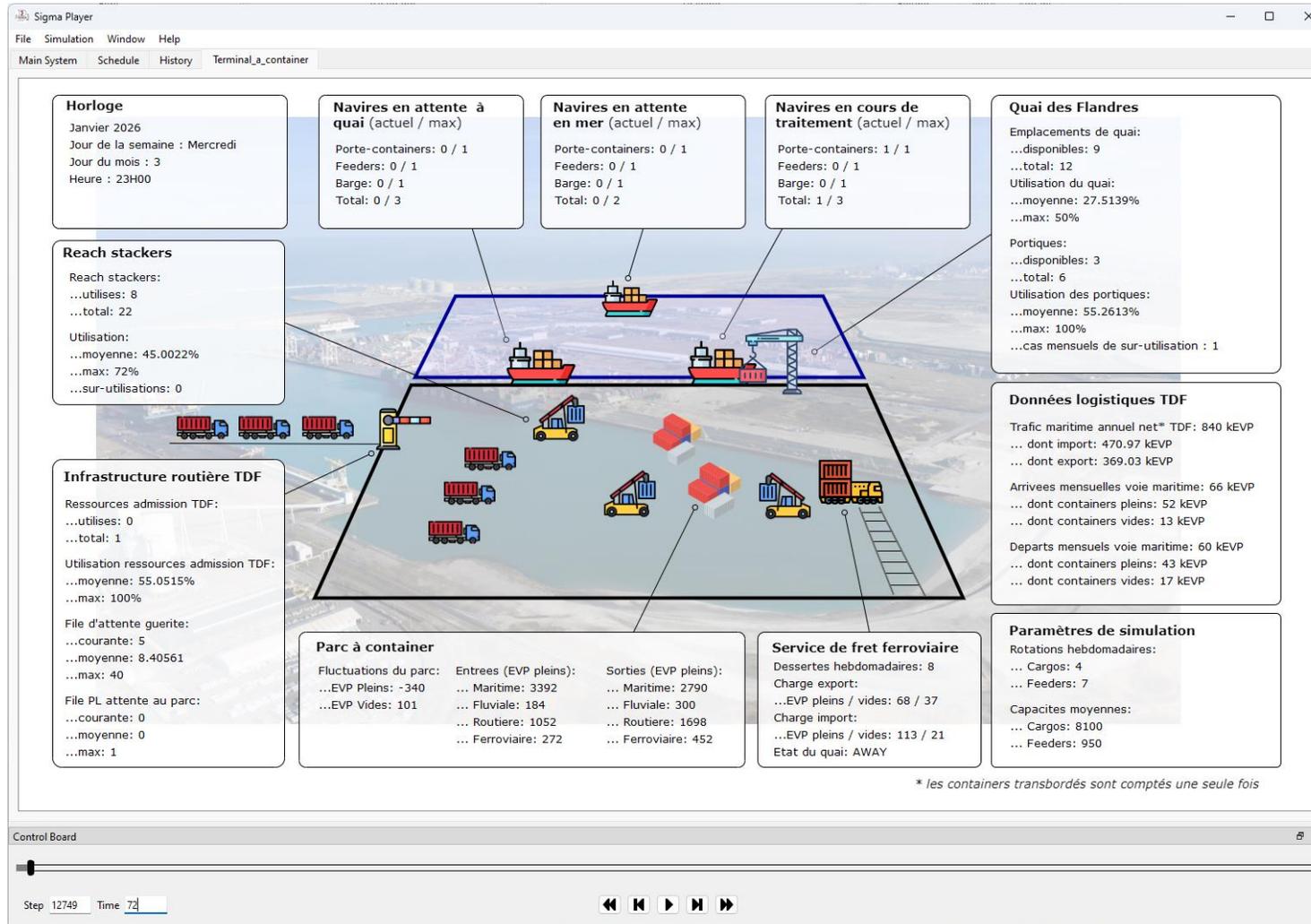


Phase 3 :
Déploiement et utilisation



Déploiement et utilisation

Execution interactive de la simulation



- Exécution pas à pas de la simulation
- Projection des variables & métriques sur des interfaces personnalisées
- Accès aux variables & métriques du modèle à l'aide d'un explorateur
- Permet de comprendre et d'expliquer le fonctionnement du modèle
- Permet d'étudier le contexte (voir la cause) d'une inefficacité / d'un goulot d'étranglement
- Un seul jeu de paramètre à la fois – peu adapté à la réalisation de scénarios



Déploiement et utilisation

Cas d'étude : Résilience des installations maritimes – Contexte

- Les navires accostent et sont déchargés / chargés grâce aux portiques installés le long du quai.
- Le plan « CAP 2020 » prévoit une extension de 2km de longueur de quai et l'augmentation du nombre de portiques avant 2035
- Ce cas d'étude montre comment le prototype de modèle Σ^{TM} détaillé peut être utilisé afin:
 - D'identifier et caractériser un phénomène de saturation de l'infrastructure maritime
 - De vérifier que les solutions envisagées et leur horizon d'implémentation sont viables

Enjeux infrastructure



- ✓ Pouvoir 'challenger' le contenu des plans de renforcement des infrastructures
- ✓ Estimer la dégradation des performances en cas de report ou d'inadéquation des investissements

modèle Σ^{TM} détaillé



Enjeux économiques

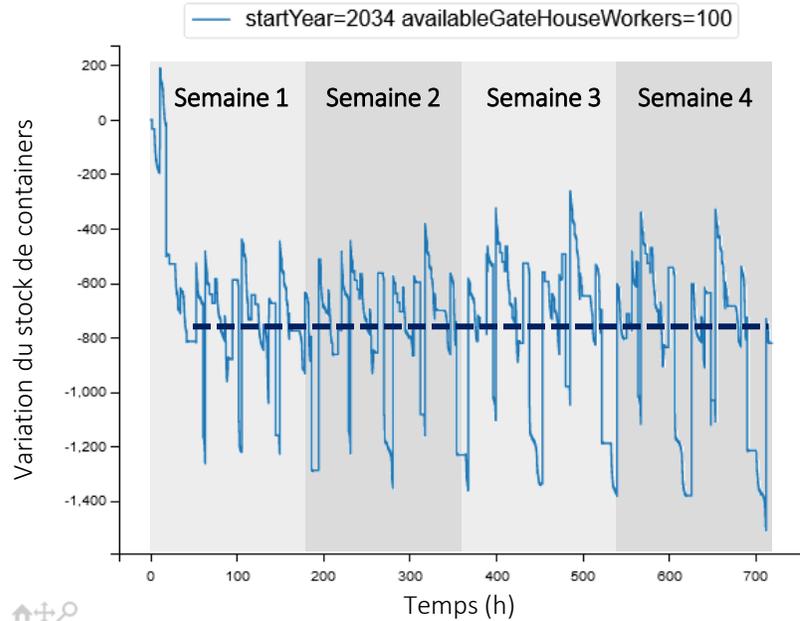


- ✓ Eviter la perte de clients lié à la mauvaise qualité de service
- ✓ Eviter le report du trafic vers des ports voisins

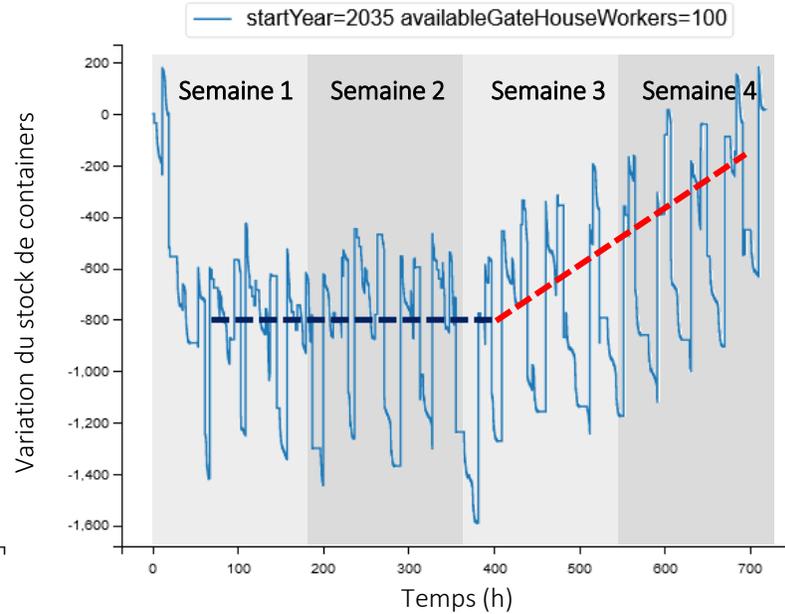


Déploiement et utilisation

Cas d'étude : Résilience des installations maritimes – Le problème



Variation de la quantité de containers pleins sur le parc – jan . 2034



Variation de la quantité de containers pleins sur le parc – jan . 2035

Hypothèses :

- Flux logistiques selon les hypothèses présentées précédemment : Simulation pour les années **2034** et **2035**
- Infrastructures maritimes & ressources de manutention **telles qu'aujourd'hui**
- **4x escales cargos / semaine**
- **7x escales feeders / semaine**
- Les cargos sont prioritaires sur les feeders, et les feeders sont prioritaires sur les barges
- La guérite d'accès n'est pas limitante pour l'admission des PL

Observations :

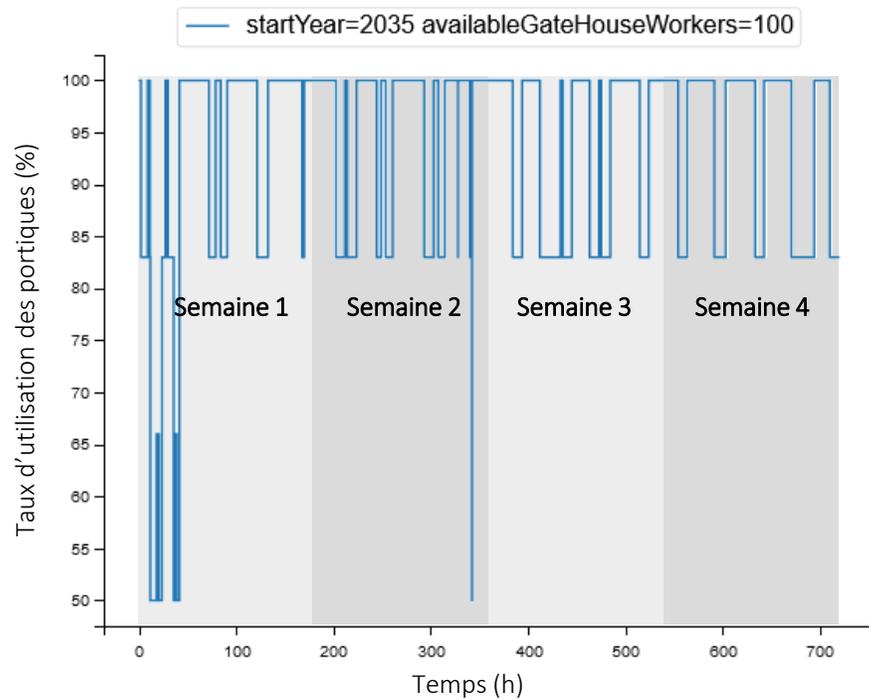
Variation non contrôlée du stock de containers à partir de 2035



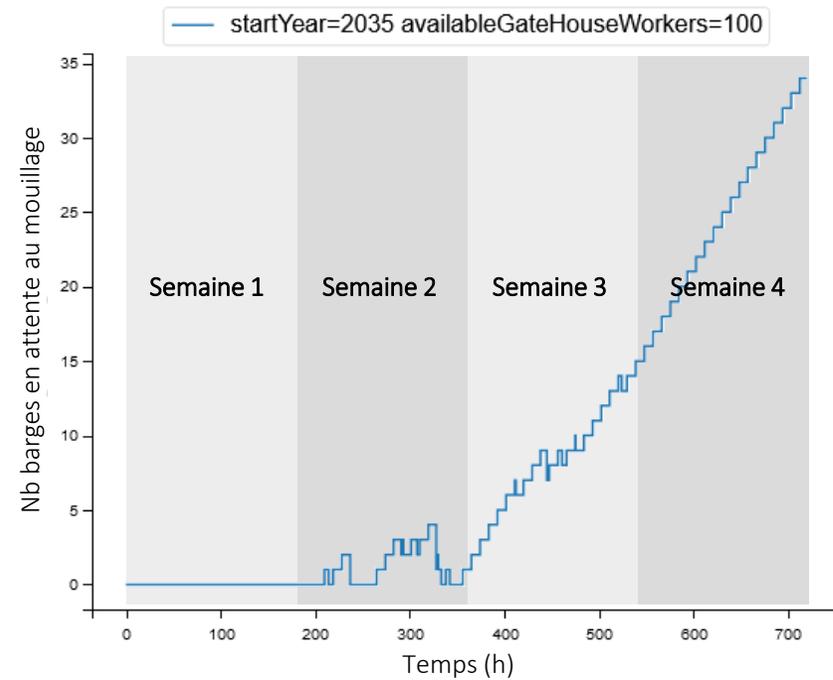
Déploiement et utilisation

Cas d'étude : Résilience des installations maritimes – Causes racines

L'augmentation de la fréquence des escales des barges, des cargaisons et de la durée des escales des feeders conduit à la saturation des ressources de manutention, ce qui entraîne l'incapacité d'amarrer de nouveaux navires et de les traiter. L'équilibre entrée / sortie du parc est ainsi rompu.



Saturation quasi permanente des portiques (x6)



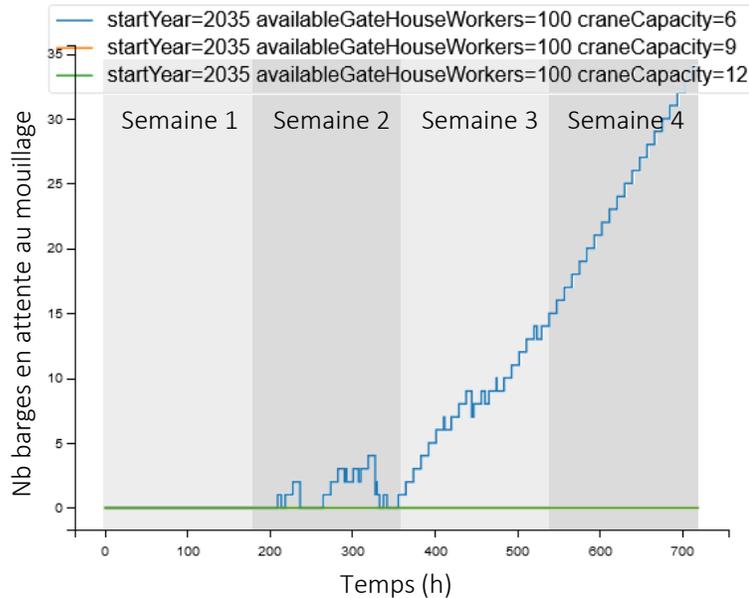
Accumulation du nombre de navires en attente d'être traité par TdF



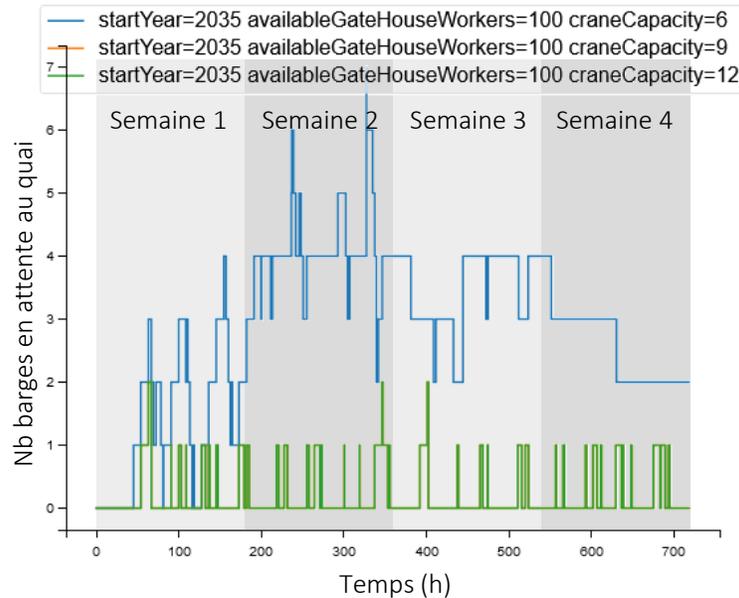
Déploiement et utilisation

Cas d'étude : Résilience des installations maritimes – Solutions possibles

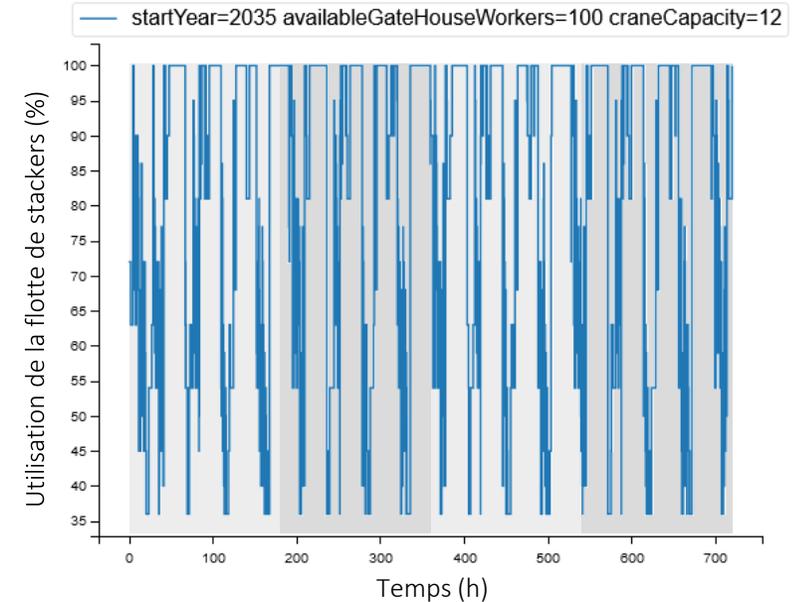
- Augmenter le nombre de portiques de 50 % en 2035 semble être le minimum
- Il est alors clair que la prochaine inefficacité est liée à la taille de la flotte de reach-stackers: elle **annule l'avantage d'opérer plus de portiques.**
- Une flotte de 30 à 35 reach-stackers (+8 / +13 par rapport à aujourd'hui) semble être suffisant en 2035. Une autre solution serait d'automatiser et de remplacer les reach-stackers par des cavaliers autonomes.



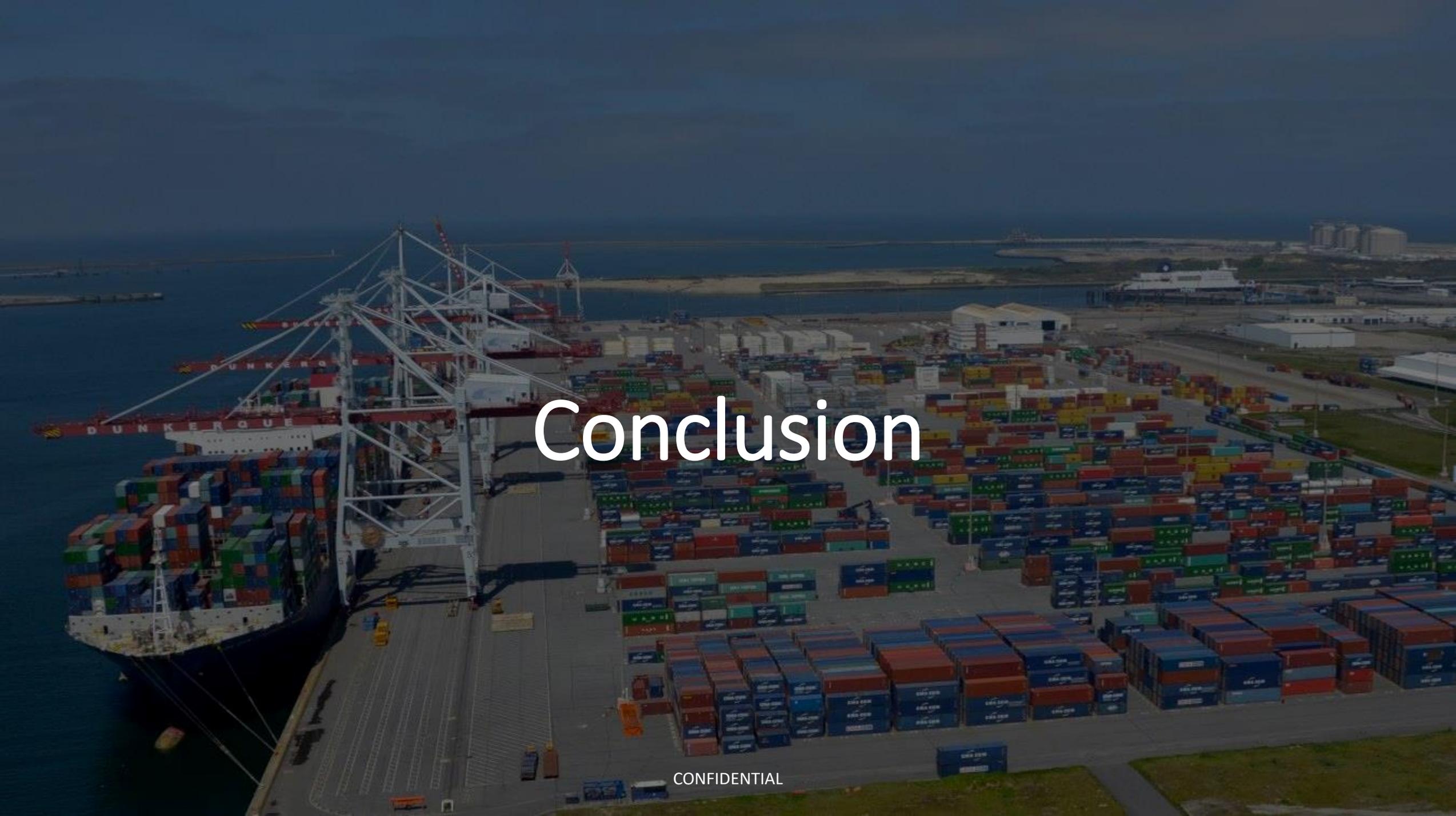
Passer de 6 à 9 portiques semble lever le problème de l'accumulation de barges au mouillage en 2035...



... mais il y a encore de nombreuses occurrences d'une barge en attente à quai sans être traitée (avec 9 ou 12 grues) ...



... La taille de la flotte de reach stackers devient le prochain problème à traiter !



Conclusion

CONFIDENTIAL



Conclusion

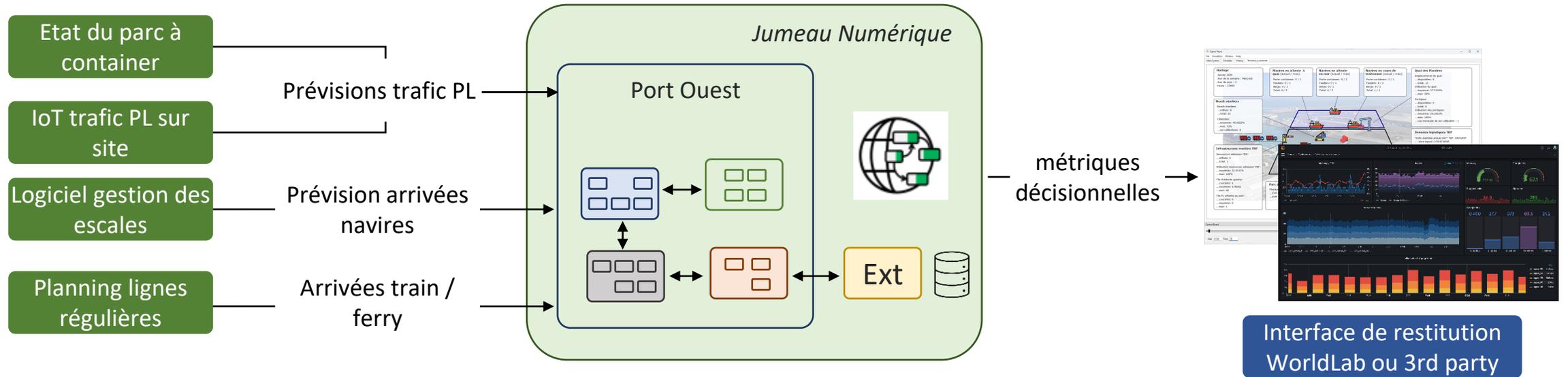
Synthèse de l'accompli

- ✓ Construction d'un **modèle systémique du port ouest**, représentant ses **composants** et ses **externalités**, leurs **interfaces** et décrivant les **processus** qu'ils réalisent. Identification des **entrées / sorties** pilotant l'activité du port
- ✓ Définition d'un **processus semi-automatisé de collecte / traitement des données** permettant de faire évoluer facilement les prévisions d'entrées / sorties et de garder le modèle à jour
- ✓ Implémentation d'un **modèle détaillé en Σ^{TM}** permettant de traiter des **cas d'usage de type « conception »**
- ✓ Réalisation d'une **interface utilisateur** permettant de comprendre et d'expliquer le fonctionnement du modèle et d'observer l'évolution de processus localisés
- ✓ Possibilité de **réaliser des analyses de tendance** en jouant sur des **combinaisons de paramètres** afin d'identifier des **goulots d'étranglement** et des **inefficacités** et d'en comprendre la cause.



Conclusion

Vers un “vrai” jumeau numérique



Prochaine étape : réalisation d'un jumeau numérique systémique permettant la **prise de décision opérationnelle** dans le cadre du projet SYDITIL financé par l'EIT Manufacturing.

- L'objectif est de **prévoir les niveaux d'activités du terminal** à container pour les **jours / semaines** à venir.
- Il se reposera sur un dérivé du modèle détaillé du Port Ouest.
- Il assurera la connexion du simulateur à un ensemble de **sources de données publiques et propriétaires**