



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom



Réflexions sur le Jumeau Numérique : organisation et gouvernance

Antoine Beugnard

antoine.beugnard@imt-atlantique.fr

12/2025





IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Jumeau Numérique de Territoire au service de la transition écologique

Le cas du plateau de Paris -Saclay
Institut Pascal

Invitation à une réflexion de 2 x 1 semaine (1-5/12/2025 et 23-27/3/2026)

Groupe trans-multi-disciplinaire

Semaine 1 : échanger sur le JNT et la transition écologique

Semaine 2 : le JNT pour quoi faire ?

Des moments comme j'aimerais en avoir plus souvent en recherche...

Des présentations, des tables-rondes, des ateliers

Des craintes qui s'expriment

Beaucoup de choses en cours (EU LDT toolbox, JNFT)

Le numérique, une partie du problème (énergie/eau)

Laisser la décision à une boîte noire

Qui produit, possède et gère les données ?

Être piloté par la technique

Bien commun

Transparence

Sobriété

On commence à cadrer le JNT

Quels acteurs, quelles étapes d'utilisation

Des scénarios d'utilisation dans des mondes variés (4 archétypes de l'Ademe)

LA SOCIÉTÉ EN 2050		S1 GÉNÉRATION FRUGALE	S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES	S3 TECHNOLOGIES VERTES	S4 PARI RÉPARATEUR	ADÈME
MODES DE VIE	Société	<ul style="list-style-type: none"> Recherche de sens Frugalité choisie mais aussi contrainte Préférences pour le local Nature sanctuarisée 	<ul style="list-style-type: none"> Évolution soutenable des modes de vie Économie du partage Équité Préservation de la nature inscrite dans le droit 	<ul style="list-style-type: none"> Plus de nouvelles technologies que de sobriété Consumérisme « vert » au profit des populations solvables, société connectée Les services rendus par la nature sont optimisés 	<ul style="list-style-type: none"> Sauvegarde des modes de vie de consommation de masse La nature est une ressource à exploiter Confiance dans la capacité à réparer les dégâts causés aux écosystèmes 	Société
	Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> Division par 3 de la consommation de viande Part du bio: 70 % 	<ul style="list-style-type: none"> Division par 2 de la consommation de viande Part du bio: 50 % 	<ul style="list-style-type: none"> Baisse de 30 % de la consommation de viande Part du bio: 30 % 	<ul style="list-style-type: none"> Consommation de viande quasi-stable (baisse de 10 %), complétée par des protéines de synthèse ou végétales 	Alimentation
	Habitat	<ul style="list-style-type: none"> Rénovation massive et rapide Limitation forte de la construction neuve (transformation de logements vacants et résidences secondaires en résidences principales) 	<ul style="list-style-type: none"> Rénovation massive, évolutions graduelles mais profondes des modes de vie (cohabitation plus développée et adaptation de la taille des logements à celle des ménages) 	<ul style="list-style-type: none"> Déconstruction-reconstruction à grande échelle de logements Ensemble des logements rénovés mais de façon peu performante: la moitié seulement au niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC) 	<ul style="list-style-type: none"> Maintien de la construction neuve La moitié des logements seulement est rénovée au niveau BBC Les équipements se multiplient, alliant innovations technologiques et efficacité énergétique 	Habitat
	Mobilité des personnes	<ul style="list-style-type: none"> Réduction forte de la mobilité Réduction d'un tiers des km parcourus par personne La moitié des trajets à pied ou à vélo 	<ul style="list-style-type: none"> Mobilité maîtrisée - 17 % de km parcourus par personne Près de la moitié des trajets à pied ou à vélo 	<ul style="list-style-type: none"> Mobilités accompagnées par l'État pour les maîtriser : infrastructures, télétravail massif, covoiturage + 13 % de km parcourus par personne 30 % des trajets à pied ou à vélo 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation forte des mobilités + 28 % de km parcourus par personne Recherche de vitesse 20 % des trajets à pied ou à vélo 	Mobilité des personnes
ECONOMIE	Technique	<ul style="list-style-type: none"> Innovation autant organisationnelle que technique Règne des low-tech, réutilisation et réparation Numérique collaboratif Consommation des data centers stable grâce à la stabilisation des flux 	<ul style="list-style-type: none"> Investissement massif efficacité énergétique, ENR et infrastructures Numérique au service du développement territorial Consommation des data centers stable grâce à la stabilisation des flux 	<ul style="list-style-type: none"> Ciblage sur les technologies les plus compétitives pour décarboner Numérique au service de l'optimisation Les data centers consomment 10 fois plus d'énergie qu'en 2020 	<ul style="list-style-type: none"> Soutien de l'offre Coopération internationale forte et ciblée sur quelques filières clés Planification centralisée du système énergétique 	Technique
	Gouvernance	<ul style="list-style-type: none"> Échelles de décision, coopération internationale Décision locale, faible coopération internationale Réglementation, interdiction et rationnement via des quotas 	<ul style="list-style-type: none"> Gouvernance partagée Fiscalité environnementale et redistribution Décisions nationales et coopération européenne 	<ul style="list-style-type: none"> Cadre de régulation minimale pour les acteurs privés État planificateur Fiscalité carbone ciblée 	<ul style="list-style-type: none"> Internet des objets et intelligence artificielle omniprésents : les data centers consomment 15 fois plus d'énergie qu'en 2020 	Gouvernance
	Territoire	<ul style="list-style-type: none"> Rôle important du territoire pour les ressources et l'action Démétropolisation en faveur des villes moyennes et des zones rurales 	<ul style="list-style-type: none"> Reconquête démographique des villes moyennes Coopération entre territoires Planification énergétique territoriale et politiques foncières 	<ul style="list-style-type: none"> Métropolisation, mise en concurrence des territoires, villes fonctionnelles 	<ul style="list-style-type: none"> Faible dimension territoriale, étalement urbain, agriculture intensive 	Territoire
	Macro-économie	<ul style="list-style-type: none"> Nouveaux indicateurs de prospérité (écarts de revenus, qualité de la vie...) Commerce international contracté 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance qualitative, « réindustrialisation » de secteurs clés en lien avec territoires Commerce international régulé 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance verte, innovation poussée par la technologie Spécialisation régionale Concurrence internationale et échanges mondialisés 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance économique carbonée Fiscalité carbone minimaliste et ciblée Économie mondialisée 	Macro-économie
Industrie	<ul style="list-style-type: none"> Production au plus près des besoins 70 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> Production en valeur plutôt qu'en volume Dynamisme des marchés locaux 80 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> Décarbonation de l'énergie 60 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> Décarbonation de l'industrie partant sur le captage et stockage géologique de CO₂ 45 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage 	Industrie	

● | Descriptif des 4 scénarios | www.transitions2050.ademe.fr | © ADEME/Stéphane Kiehl

● | Descriptif des 4 scénarios | www.transitions2050.ademe.fr | © ADEME/Stéphane Kiehl | ●

- de JN

+ de JN

Conclusion

Me conforte de l'intérêt des JN (de T)

Me conforte que c'est compliqué ... techniquement et organisationnellement

(Donne des idées pour parler de TES)



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

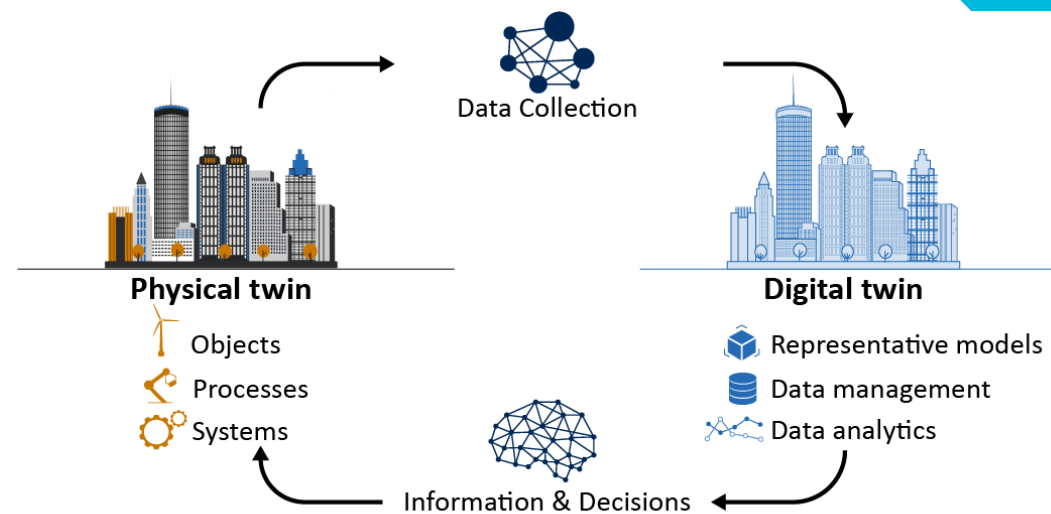


Réflexions sur le Jumeau Numérique : organisation (et gouvernance)

Point de vue

Le jumeau numérique est le **lieu d'accumulation** des données, informations, connaissances, savoirs d'une entité réelles (concrète, abstraite, existante ou en devenir)

La construction d'un jumeau numérique est donc un prétexte à **collaborer**



Sources: GAO; ladoga/stock.adobe.com. | GAO-23-106453

Couple d'**amélioration continue** :

- ▶ PT aide à améliorer DT en étant une **source de vérité**
- ▶ DT aide à améliorer PT (ou la gestion de PT) avec des **calculs**, des projections, des simulations

Jumeau numérique POUR ou jumeau numérique DE ?

Lieu d'accumulation d'information (données/modèles) qui peut, en principe, se substituer à...

On commence par un *pour*, puis on accumule...

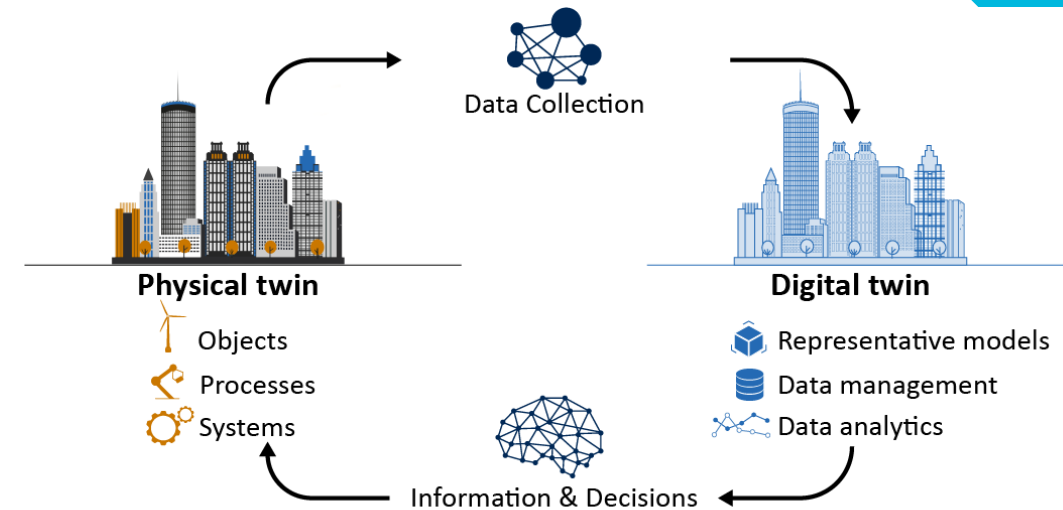
Un jumeau numérique *de* accumule :

- les points de vues
- les données, les modèles

On **accumule** aussi les **soucis** :

- théoriquement : multi-paradigme, multi-dimensions
- techniquement : interopérabilité, communication, volume
- socialement : accès, partage
- légalement : droit, vie privée

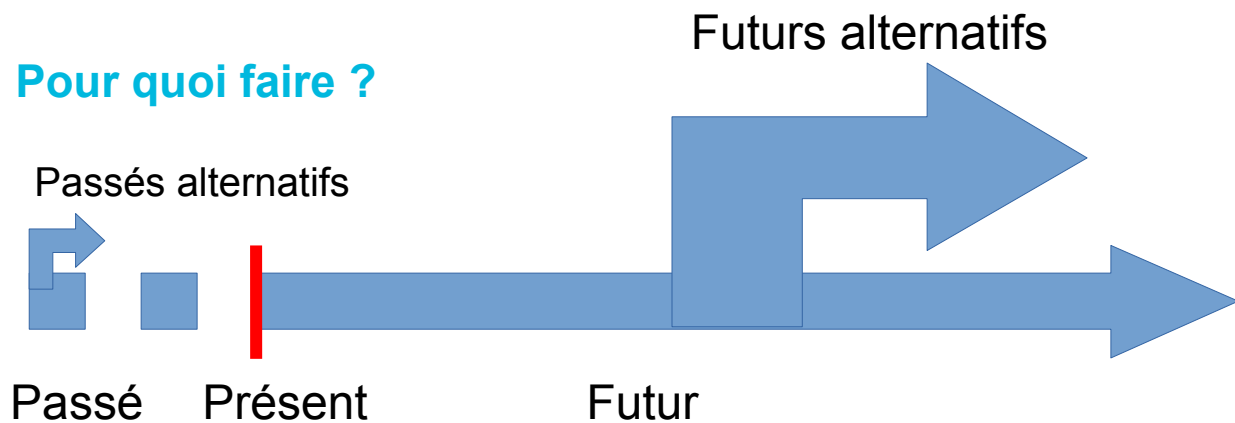
Explicitement !



Sources: GAO; ladoga/stock.adobe.com. | GAO-23-106453

Le jumeau numérique

Pour quoi faire ?

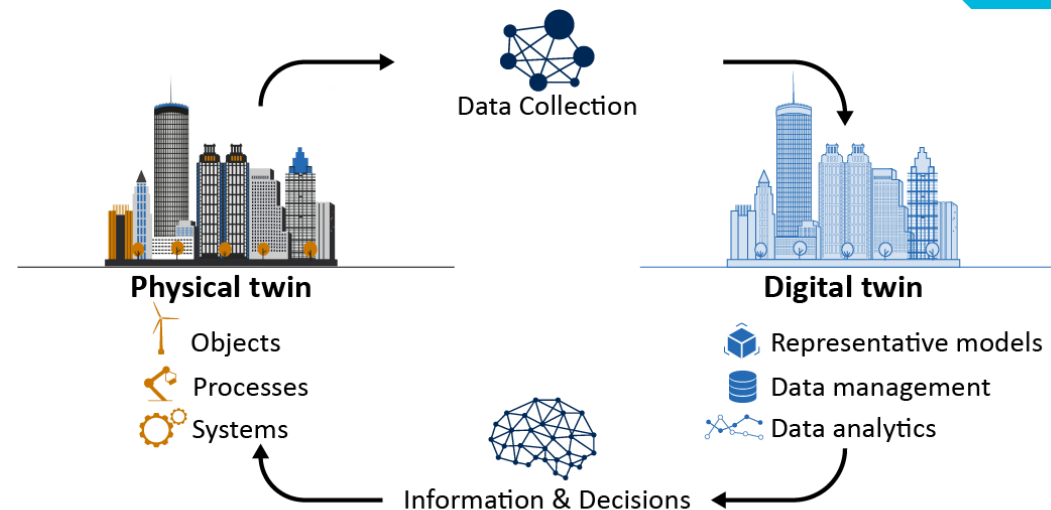


Description
Diagnostic
Compréhension
Explication

Que s'est-il passé ?
Pourquoi cela s'est-il passé ?
Aurait-ce pu se passer autrement ?

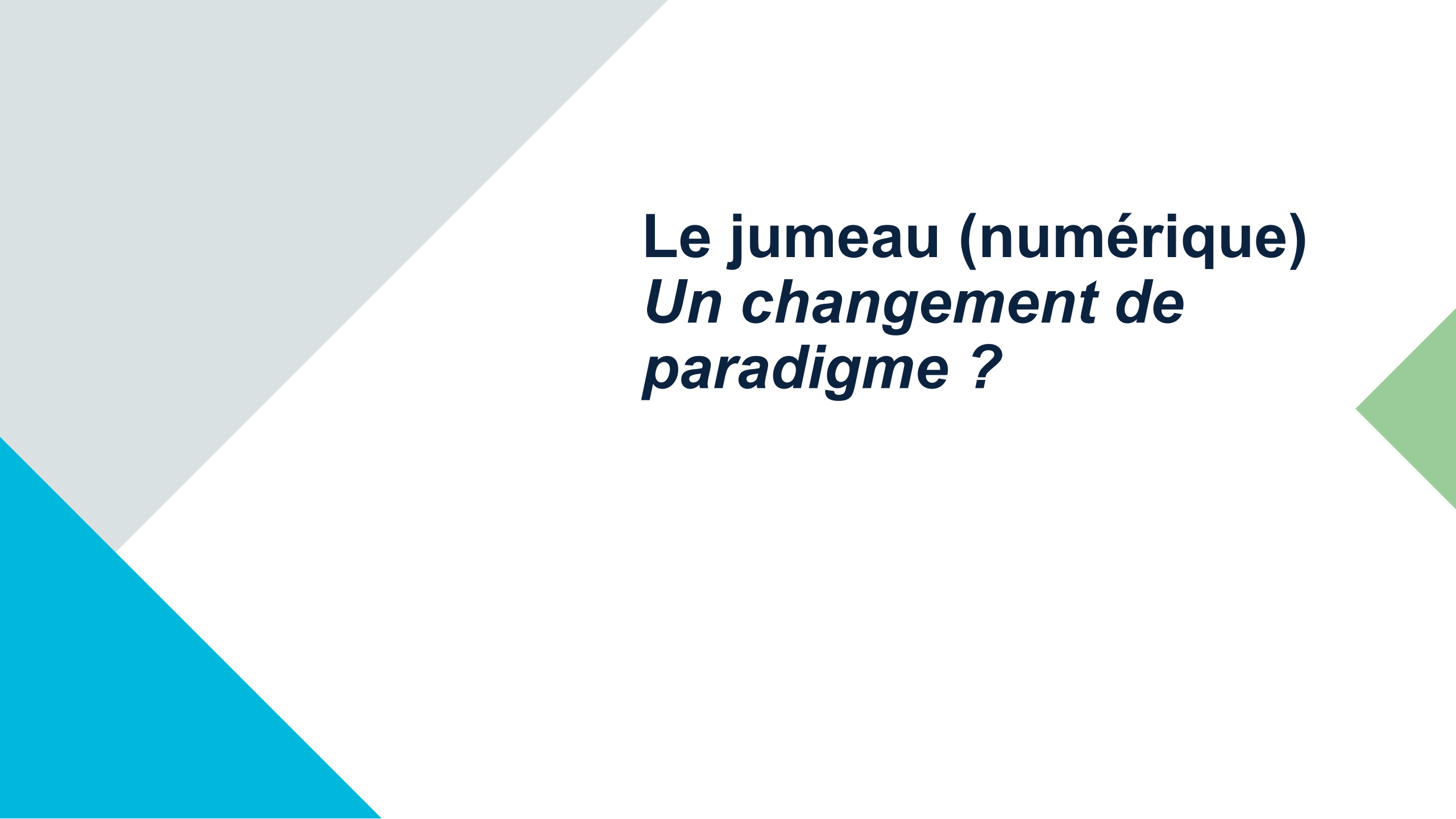
Prévision
Prédiction
Prescription
Optimiser

Que va-t-il se passer ?
Que peut-il se passer ?
Que devrait-il se passer ?
Que puis-je changer pour qu'autre chose se passe ?



Sources: GAO; ladoga/stock.adobe.com. | GAO-23-106453

On modélise, on simule, on collecte des données réelles, on les compare, etc.
On teste des hypothèses, des modèles, on valide...



Le jumeau (numérique)
***Un changement de
paradigme ?***

Le paradigme jumeau (numérique)

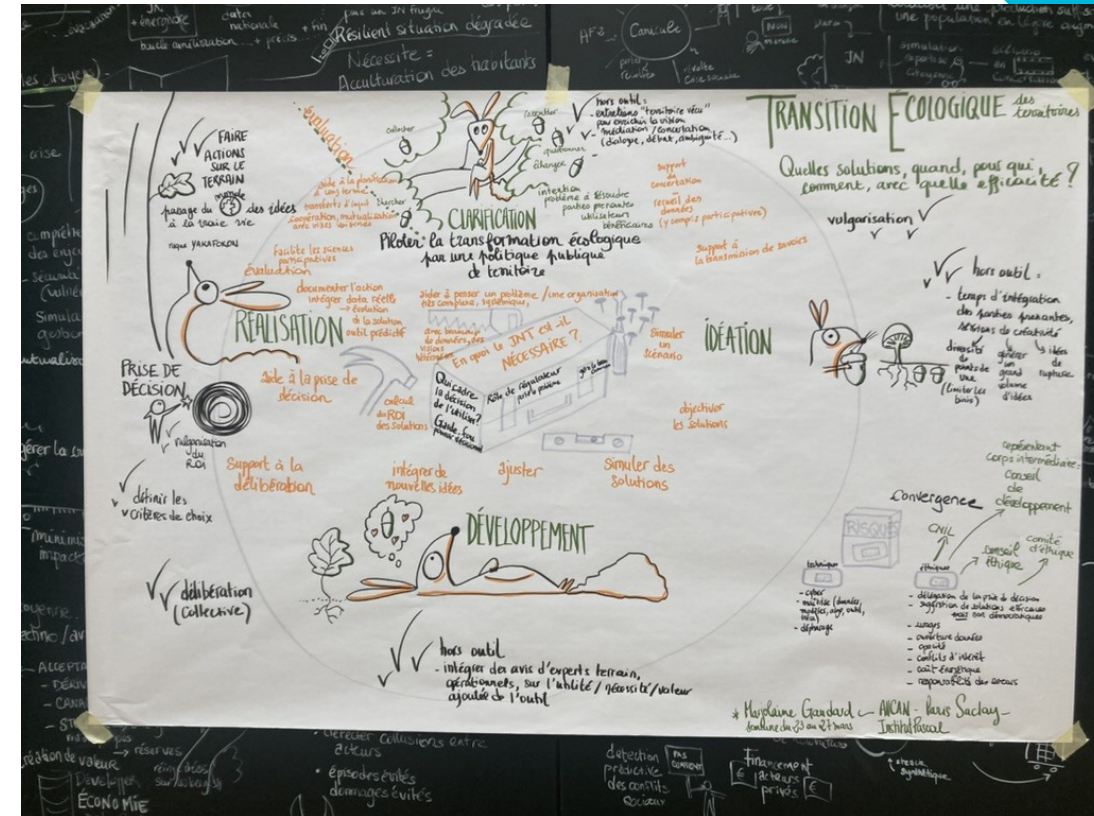
Au delà de l'objet technologique

Une façon de partager la connaissance

- Que partage-t-on ?
- Que rend-on accessible ? À qui ?
- De quoi a-t-on besoin ?

Une façon de gouverner la connaissance

- Trace et transparence des décisions
- Que fait-on de cette connaissance ?



Il faut de l'énergie humaine pour lutter contre l'entropie lié à l'accumulation des informations

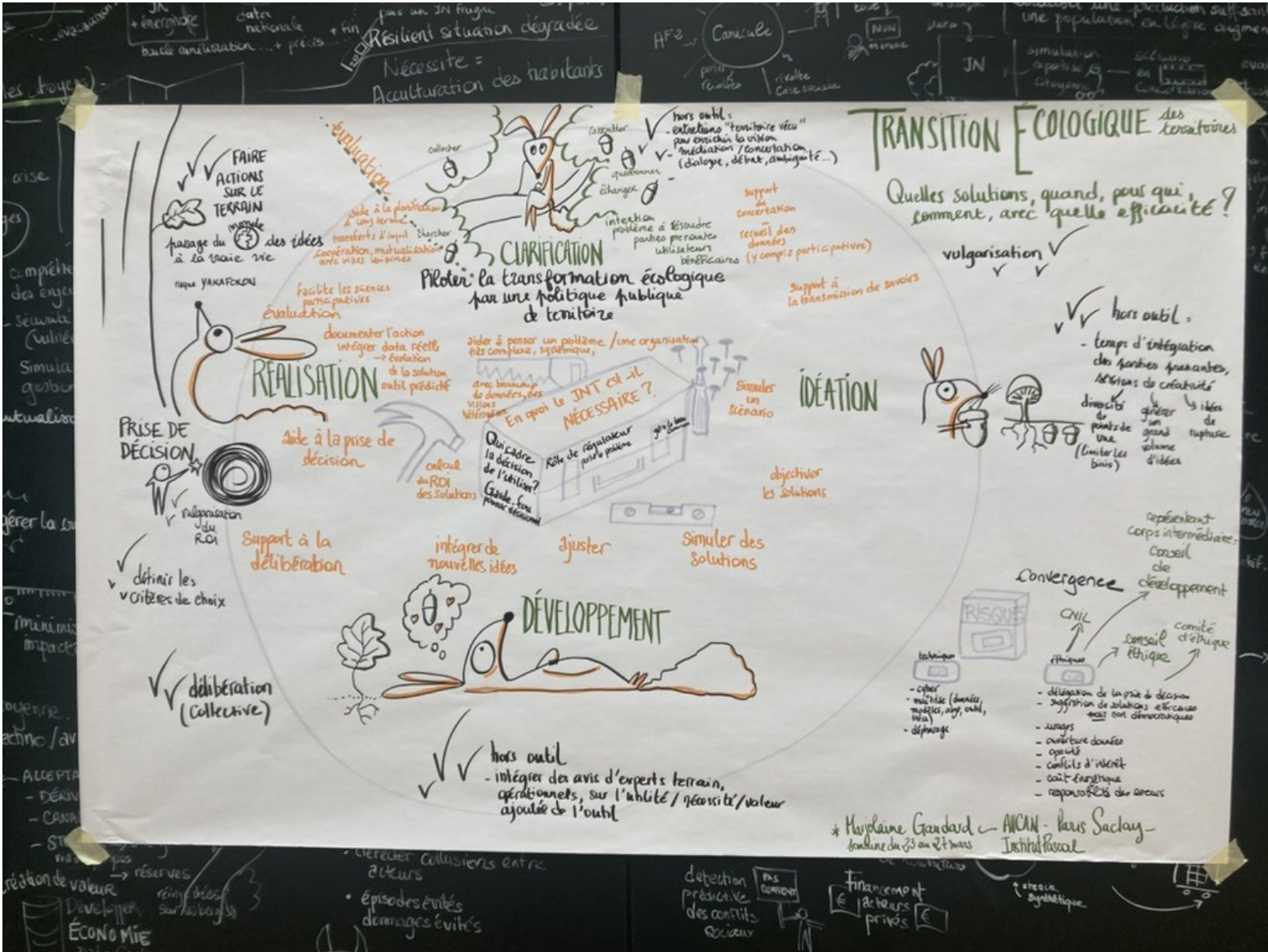
Données, modèles, du système, de sa gouvernance, de sa construction, de ses évolutions, ...

On peut imaginer une version non numérique du jumeau...

La construction est permanente, itérative, incrémentale.



Top-down (guidée par les besoins) et bottom-up (à partir de l'existant)





Développer un jumeau numérique

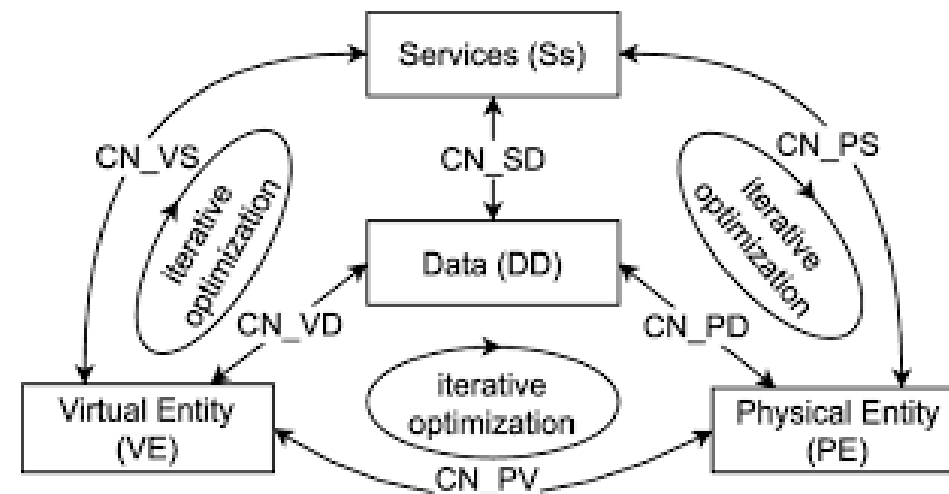
Contexte

Le modèle de Tao et al. (2018) donne une vision du contexte d'un JN (VE).

Il identifie les « aspects » à considérer.

1. L'entité physique
2. L'entité virtuelle
3. Les données
4. Les services
5. Les communications entre tout ça...

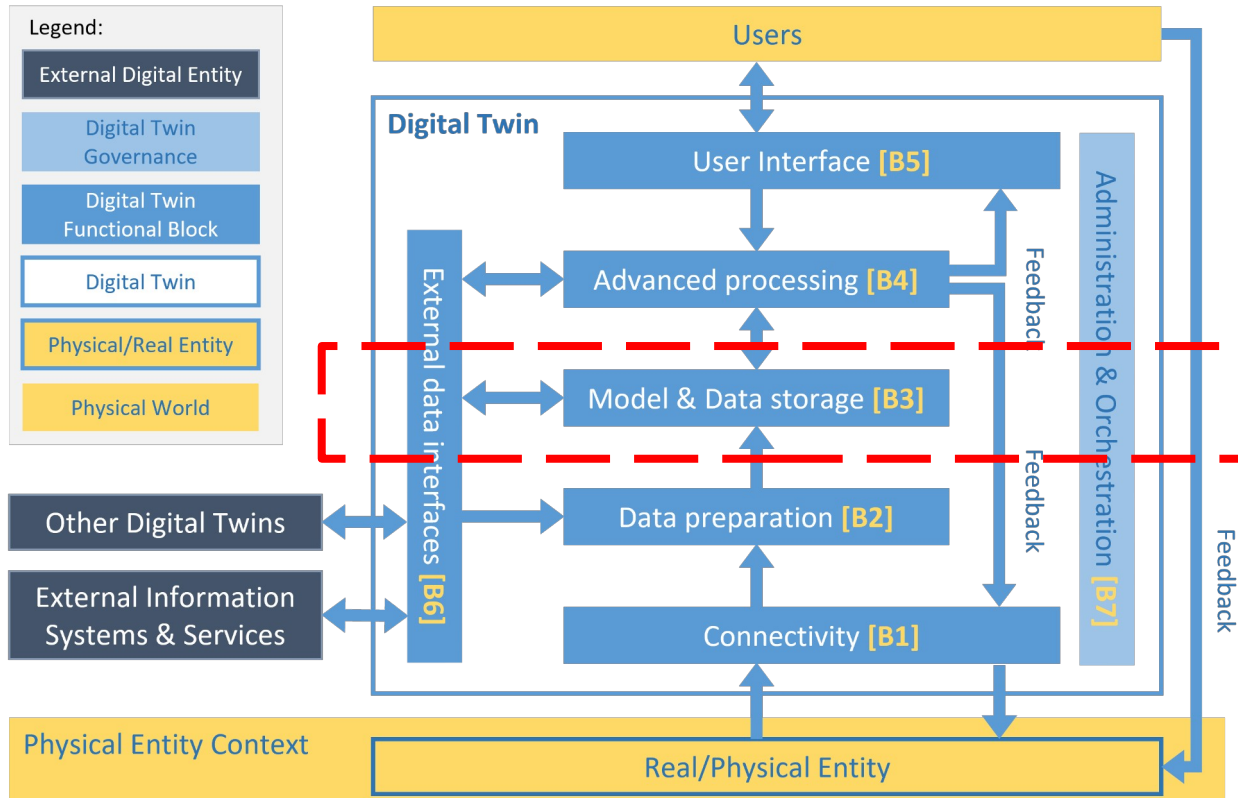
(Ce modèle mélange beaucoup de points de vue ; les parties prenantes n'apparaissent pas)



F. Tao, M. Zhang, Y. Liu, N.Y.C. Nee, "Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment," CIRP Annals, vol. 67, no. 1, pp. 169–172, May, 2018.

Développer un jumeau numérique

Une architecture fonctionnelle (AIF)



Les blocs fonctionnels
- B1 à B5 (le coeur B3)

Les interfaces de composition
- B6

Les outils d'administration
- B7

Les flux de donnée
- Feedback explicite

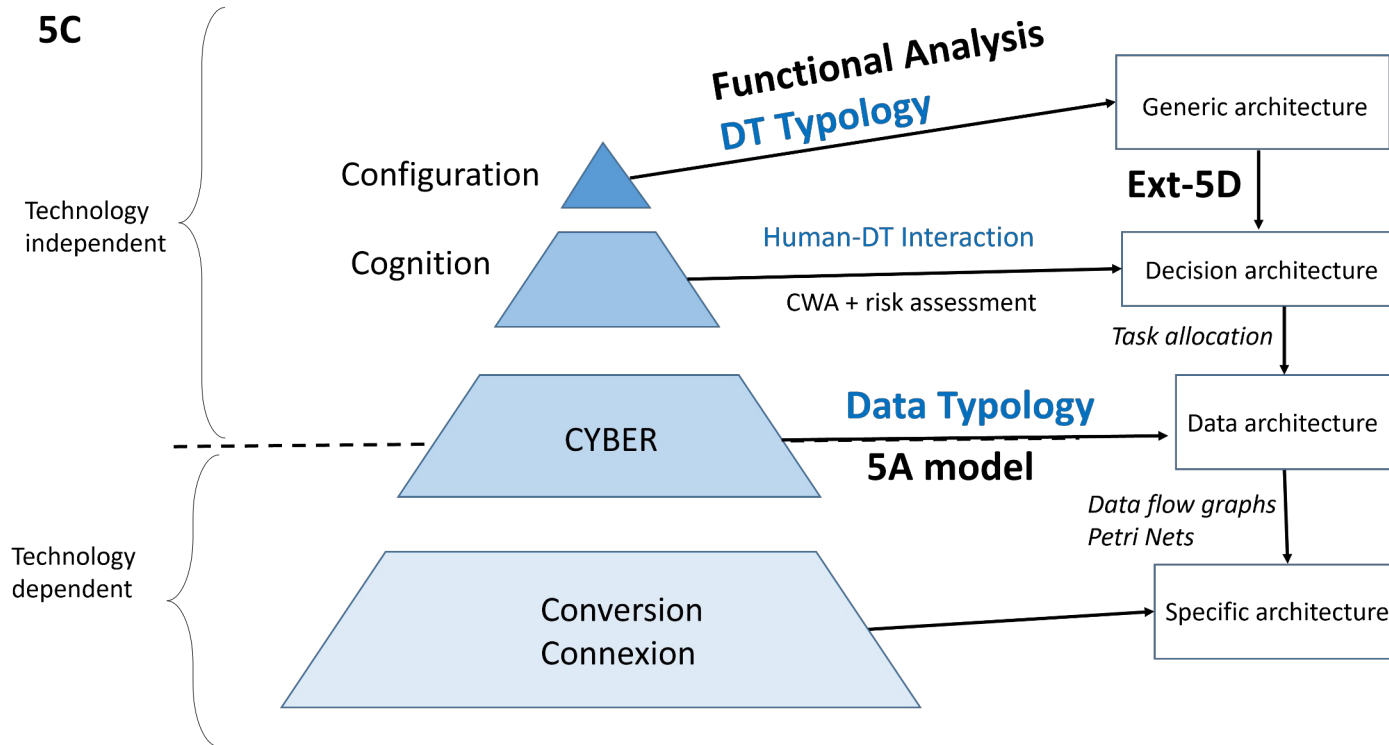
L'environnement externe

Pour l'industrie, et plus...

(Ce modèle embarque trop de choses ; la connectivité, les interfaces utilisateur... pourquoi ?)

Développer un jumeau numérique

Démarche



Développer un jumeau numérique

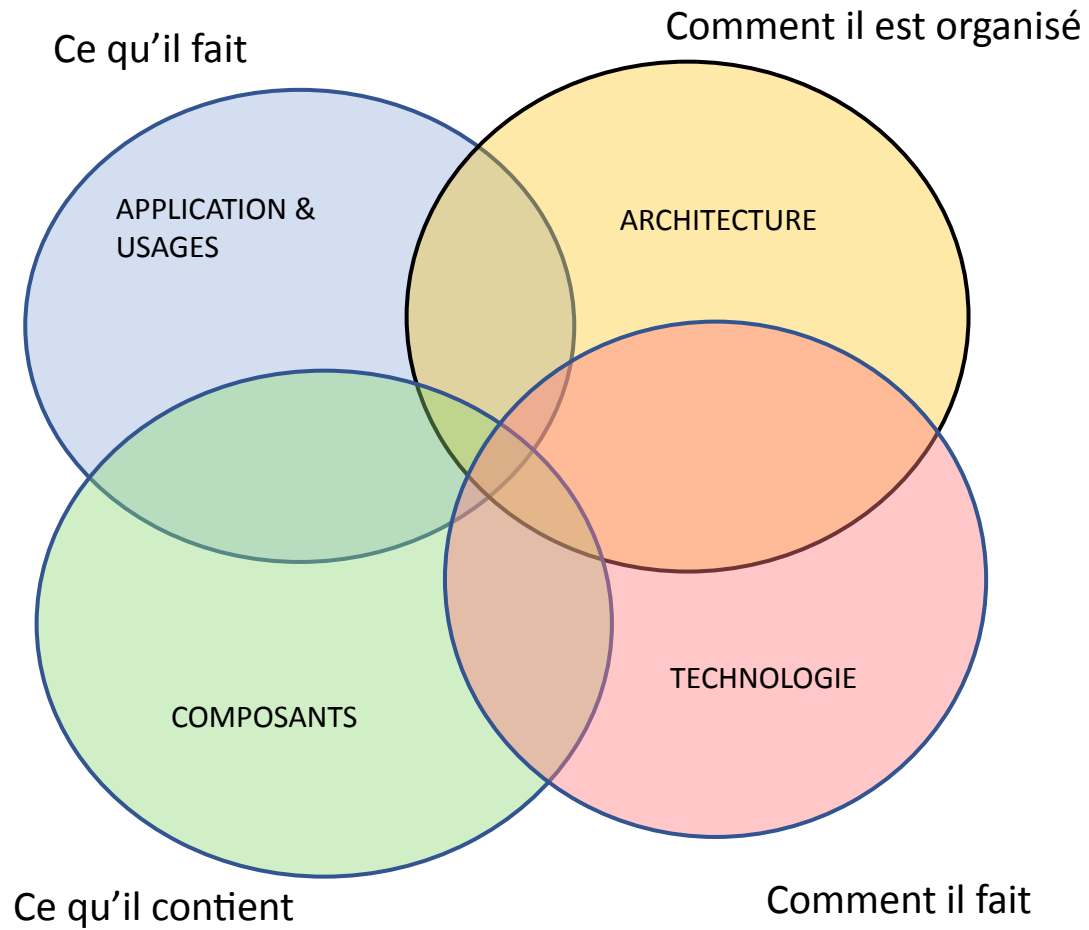
1. Ce qu'il fait
 1. Pour qui
2. Comment il est organisé
3. Ce qu'il contient
 1. Données, modèles, ...
 2. Partage, propriétés, sécurité, éthique, ...
4. Comment il le fait
 1. Quel impact environnement et sociétal

(Ce modèle masque la durée, l'itérativité du développement)

Adapted from 5C CPS Architecture (*Lee and Bagheri 2013*) by Nathalie Jullien, UBS, 2024

Développer un jumeau numérique

Démarche – points de vue



Des architectures, des composants
pour la **réutilisation**
Un dimensionnement adapté
pour la **sobriété**
Des modèles du métier
pour la **co-conception**
Un dialogue avec les experts
pour **l'acceptabilité**

Nathalie Jullien, UBS, 2024

L'objet scientifique

Le **jumeau** expose des services d'accès aux modèles et données.

Comment identifier les **variantes** dans **l'espace** et le **temps** ?

Les **instances** produisent des données et fournissent (automatiquement ou pas) des configurations, des modèles.

Selon leur objectif, les **outils** consomment et produisent des données et des modèles. Il y a deux phases : une de configuration, une de calcul.

Une architecture DT-aware

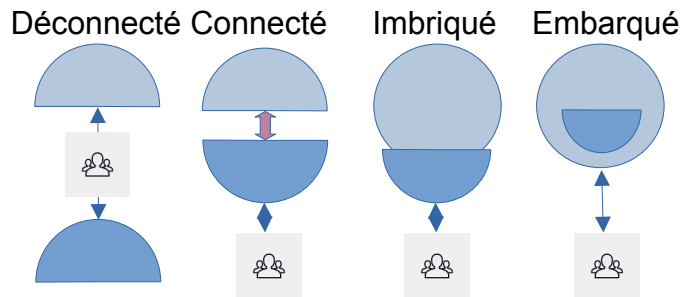
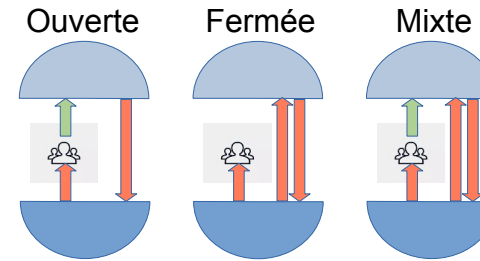
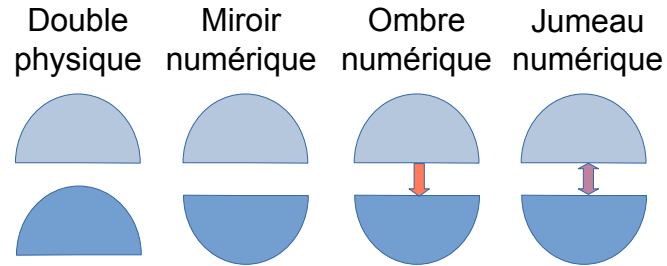
Les outils sont conçus pour se **configurer** à l'aide des informations trouvées dans le JN

Les outils enrichissent le JN avec les données qu'ils produisent, mais aussi avec leur **configuration**.

Les informations sont caractérisées par des **métadonnées**.

Le jumeau numérique

Questions inutile ? Ou des cas particuliers, des étapes, des points de passages, des configurations



1 Data Acquisition & Ingestion	9 Synthetic Data Generation	17 Enterprise System Integration	23 Edge AI & Intelligence	29 Prediction	39 Basic Visualization	45 Dashboards	
2 Data Streaming	10 Ontology Management	18 Eng. System Integration	24 Command & Control	30 Machine Learning ML	40 Advanced Visualization	46 Continuous Intelligence	
3 Data Transformation	11 Digital Twin (DT) Model Repository	19 OT/IoT System Integration	25 Orchestration	31 Artificial Intelligence AI	35 Prescriptive Recommendations	41 Real-time Monitoring	47 Business Intelligence
4 Data Contextualization	12 DT Instance Repository	20 Digital Twin Integration	26 Alerts & Notifications	32 Federated Learning	36 Business Rules	42 Entity Relationship Visualization	48 BPM & Workflow
5 Batch Processing	13 Temporal Data Store	21 Collab Platform Integration	27 Reporting	33 Simulation	37 Distributed Ledger & Smart Contracts	43 Augmented Reality AR	49 Gaming Engine Visualization
6 Real-time Processing	14 Data Storage & Archive Services	22 API Services	28 Data Analysis & Analytics	34 Mathematical Analytics	38 Composition	44 Virtual Reality VR	50 3D Rendering
7 Data PubSub Push	15 Simulation Model Repository	52 Device Management	54 Event Logging	56 Data Encryption	58 Security	60 Safety	51 Gamification
8 Data Aggregation	16 AI Model Repository	53 System Monitoring	54 Data Governance	57 Device Security	59 Privacy	61 Reliability	62 Resilience

● Data Services
 ● Integration
 ● Intelligence
 ● UX
 ● Management
 ● Trustworthiness

Tout cela dit peu « comment organiser le JN. »

Des défis

Nommer les informations

Gérer les espaces de nommage

Responsabilité des informations
(trace, validité)

Qualifier les données – métadonnées

Le jumeau numérique

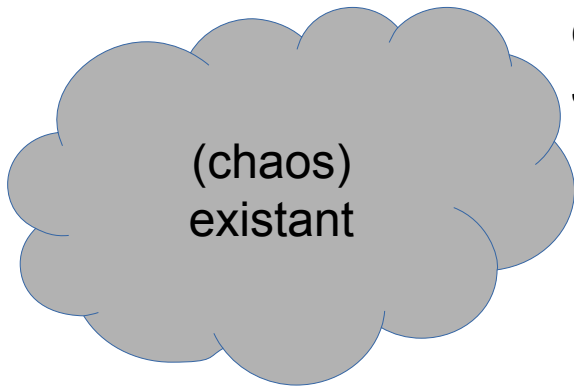
Vision globale

(1) Définition des contrats de nommage, d'organisation, de traçage, de qualification...

Le méta-modèle du JN

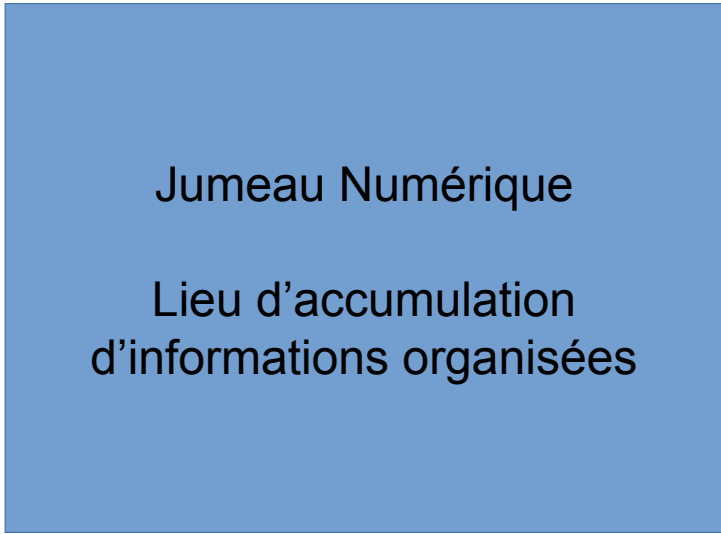
Usine à
Famille de
Jumeau
Numérique

(2) Génération ou intégration des contrats pour un « univers » de JN



Le modèle du JN

(3) Vie du JN ; ajout d'information en respectant les règles...



Ensembles d'adapteurs selon outils et système de référence

Organiser les espaces de nommage

Axes de réflexion :

- URI templates (grammaire de chemins ?)
- Un nommage de base : lieu de stockage
- Des nommages « métier »
- Une organisation des nommages

Organiser les métadonnées

- date et localisation
- source
- propriétés
 - accessibilité/protection/droits
 - précision/qualité
 - validité/niveau de confiance

Des objectifs

Ne pas réinventer la roue

Partir de l'existant

Organiser, organiser, organiser

Contraindre, vérifier, accumuler

Une architecture **DT-aware**

Les outils sont conçus pour se **configurer** à l'aide des informations trouvées dans le JN

Les informations sont caractérisées par des **métadonnées**.

Le jumeau numérique

La Sorting Line de l'usine Fishertechnik



Zones

- dehors
- dedans
- tapis
- entrée
- détection
- éjection
- stockage blanc
- stockage rouge
- stockage bleu

Équipements

- cellule PE 1
- cellule PE 2
- détecteur couleur
- cellule PE Bc
- cellule PE Rg
- cellule PE BI
- moteur tapis
- pompe
- éjecteur Bc
- éjecteur Rg
- éjecteur BI

Événements

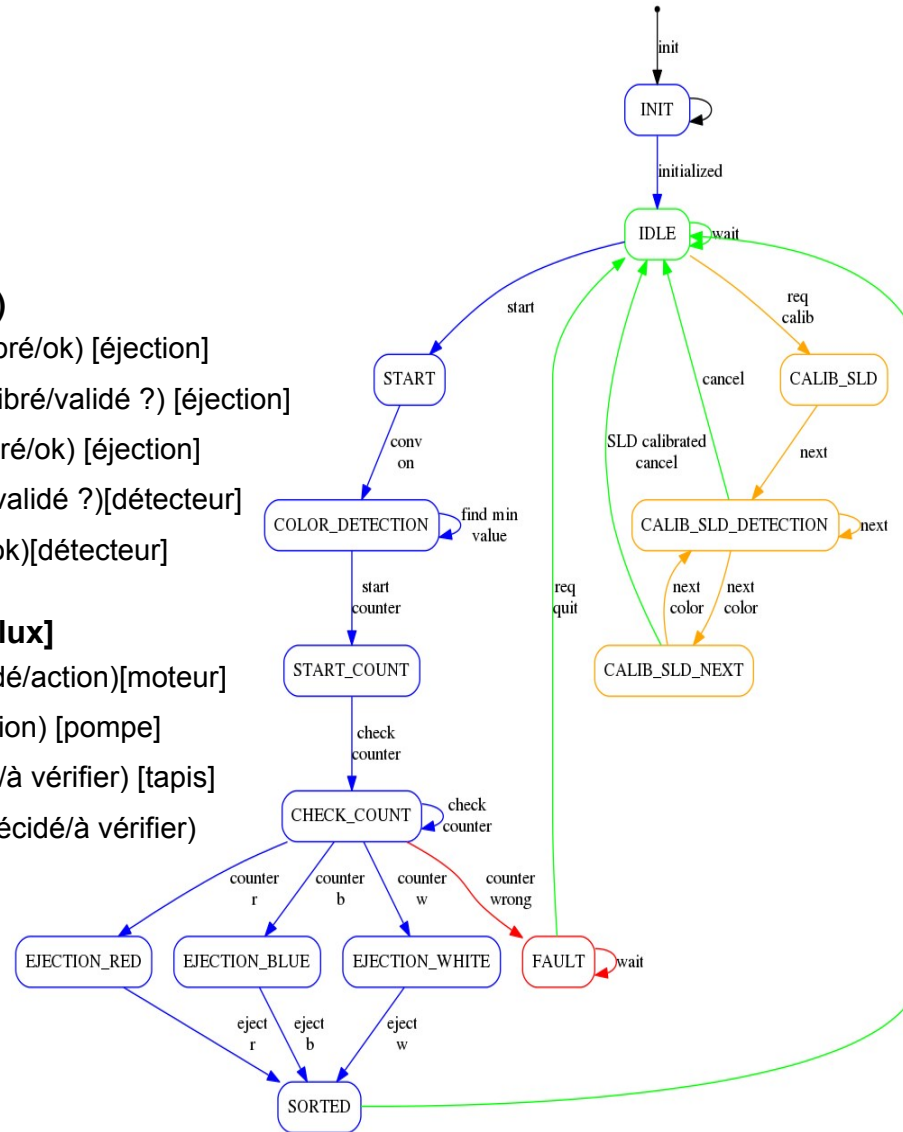
- arrivée SLD [PE1 1 → 0]
- détection → Bc, Rg, BI [détecteur]
- sortie détection [PE2 1 → 0]
- on/off [moteur, pompe]
- éjecte Bc, Rg, BI
- arrivée (Bc, Rg, BI) [PEc 1 → 0]
- départ (Bc, Rg, BI) [PEc 0 → 1]
- faute (...)

Data (Configuration)

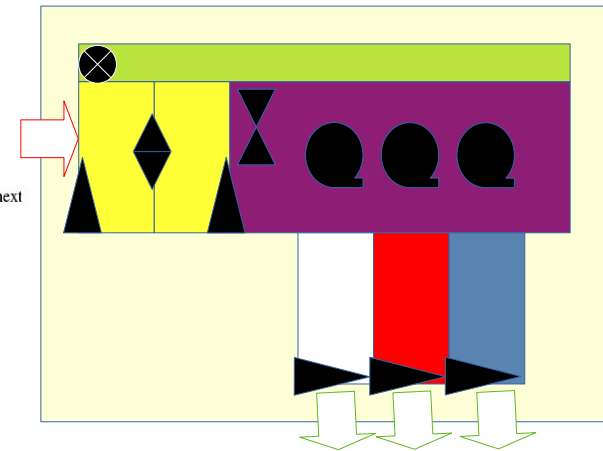
- compteur Bc **12** (calibré/ok) [éjection]
- compteur Rg **17** (calibré/validé ?) [éjection]
- compteur BI **22** (calibré/ok) [éjection]
- seuil Rg **100** (décidé/validé ?)[détecteur]
- seuil Bc **200** (décidé/ok)[détecteur]

Data (état) (initial) [flux]

- **moteur tapis off** (décidé/action)[moteur]
- **pompe off** (décidé/action) [pompe]
- **tapis# 0** jeton (espéré/à vérifier) [tapis]
- **stockages# 0** jeton (décidé/à vérifier)



Abstraction spatiale



- nom://equipements/usine/ft/sld/pe1
- nom://zones/usine/ft/sld/tapis
- nom://data/usine/ft/sld/tapis
- nom://data/usine/ft/sld/tapis/imt1

Le jumeau numérique

La Sorting Line de l'usine Fishertechnik

Une configuration ?

- les données de configuration
- l'algorithme de contrôle
- les observables (événements)
- la topologie (abstraction spatiale, zone, équipements)
- modèles d'usure



Zones	Équipements
- dehors	- cellule PE 1 [en service]
- dedans	- cellule PE 2 [en service]
- tapis	- détecteur couleur
- entrée	- cellule PE Bc
- détection	- cellule PE Rg
- éjection	- cellule PE BI
- stockage blanc	- moteur tapis
- stockage rouge	- pompe [maintenance]
- stockage bleu	- éjecteur Bc [en panne]
	- éjecteur Rg
	- éjecteur BI

Événements

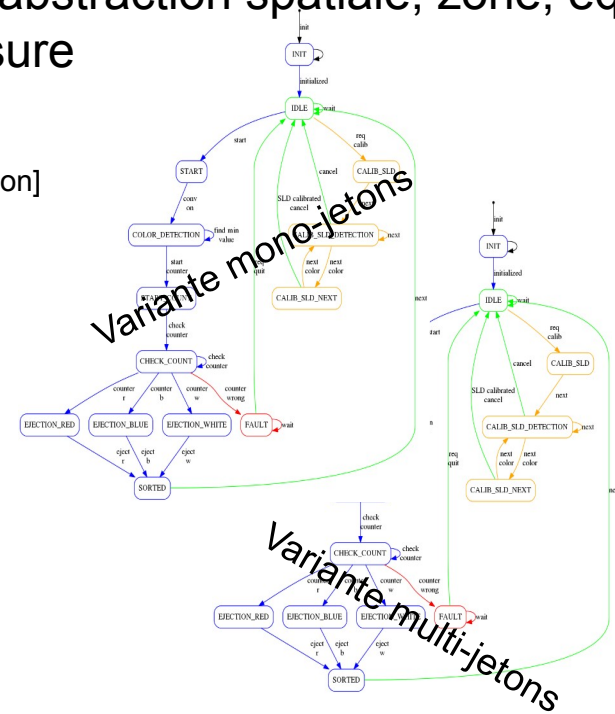
- arrivée SLD [PE1 1 → 0]
- détection → Bc, Rg, BI [détecteur]
- sortie détection [PE2 1 → 0]
- on/off [moteur, pompe]
- éjecte Bc, Rg, BI
- arrivée (Bc, Rg, BI) [PEc 1 → 0]
- départ (Bc, Rg, BI) [PEc 0 → 1]
- faute (...)

Data (Configuration)

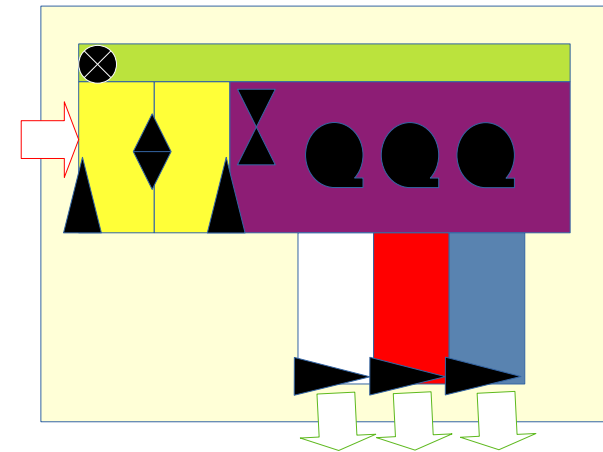
- compteur Bc 12 (calibré/ok) [éjection]
- compteur Rg 17 (calibré/validé ?) [éjection]
- compteur BI 22 (calibré/ok) [éjection]
- seuil Rg 100 (décidé/validé ?)[détecteur]
- seuil Bc 200 (décidé/ok)[détecteur]

Data (état) (initial) [flux]

- moteur tapis off (décidé/action)[moteur]
- pompe off (décidé/action) [pompe]
- tapis# 0 jeton (espéré/à vérifier) [tapis]
- stockages# 0 jeton (décidé/à vérifier)
- état des équipements, durée de fonctionnement



Abstraction spatiale



Modèles d'usure des équipements

Un contexte ?

- Une loi d'arrivée de jetons (un algo qui génère des arrivées – state aware ou non)
- Une loi de départ des jetons (un algo qui génère des départs – state aware ou non)

nom://equipements/usine/ft/sld/pe1
 nom://zones/usine/ft/sld/tapis
 nom://data/usine/ft/sld/tapis
 nom://data/usine/ft/sld/tapis/imt1

Plouzané

Zones

- dehors
- *dedans*
 - Trinité
 - Castel Nevez
 - Le Bourg
 - Le technopole
 - Ar Goat
 - Ar Mor
 - Routes
 - D789
 - Cyclables

Événements

- *arrivée* véhicules, eau, énergie

- *départ* véhicules, eau, énergie

Équipements

- cameras
- capteurs air
- capteurs véhicule
- téléphones
- source de données
 - IGN
 - SIG Brest Métropole
 - ...

Data (Configuration)

- ?

Data (état) (initial) [flux]

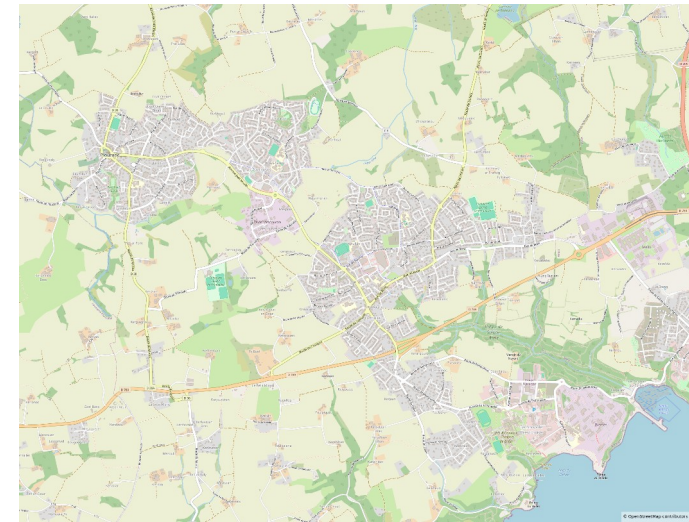
- ?

Une configuration ?

- les données de configuration
- les comportements des flux (véhicules, eau, énergie,...)
- les observables (événements)
- la topologie (abstraction spatiale, zone, équipements)
- modèles d'usure (des bâtiments, des routes, ...)
- ...

Un contexte ?

- Une loi d'arrivée de tout (un algo qui génère des **arrivées** – state aware ou non)
- Une loi de départ de tout (un algo qui génère des **départs** – state aware ou non)



nom://equipements/plouzane/
nom://zones/plouzane/
nom://data/usine/plouzane/
nom://data/plouzane/

Une autre dialectique

Méfiez-vous de celui qui veut mettre de l'ordre. Ordonner, c'est toujours se rendre le maître des autres en les gênant.
Denis Diderot

Nous adorons le chaos parce que nous aimons à produire de l'ordre.
M. C. Escher

La tâche de l'art aujourd'hui, c'est de mettre du chaos dans l'ordre.
Theodor W. Adorno

