

Jumeaux numériques



Enjeux et perspectives pour les recherches menées à INRAE

Masoomeh Taghipoor

Hervé Monod, Michael Chelle, Irène Vigneron Clémentel (Inria), Fabien Jourdan, Marjorie Domergue, Carole Caranta

*Demi-journée scientifique "jumeaux numériques » organisé par la plateforme Bilille et l'UR METRICS
Lille, 6 juillet 2023*



➤ Métaprogramme DIGIT-BIO

Biologie numérique pour explorer et prédire le vivant

- Un des 10 métaprogrammes INRAE « de seconde génération »
- Lancé en mars 2021

Plus d'informations sur les métaprogrammes INRAE : <https://www.inrae.fr/nous-connaître/metaprogrammes>

AMBITIONS :

- Soutenir et développer les recherches à **l'interface entre sciences du numérique et biologie, physique, chimie pour comprendre le fonctionnement et prédire le comportement** de systèmes biologiques
- Mobiliser les connaissances pour anticiper les impacts de contraintes sur ces systèmes, en raisonner la gestion et disposer de leviers d'action.
- À moyen terme, développer **le suivi *in silico* de quelques systèmes biologiques en s'inspirant et en adaptant le concept de jumeau numérique**

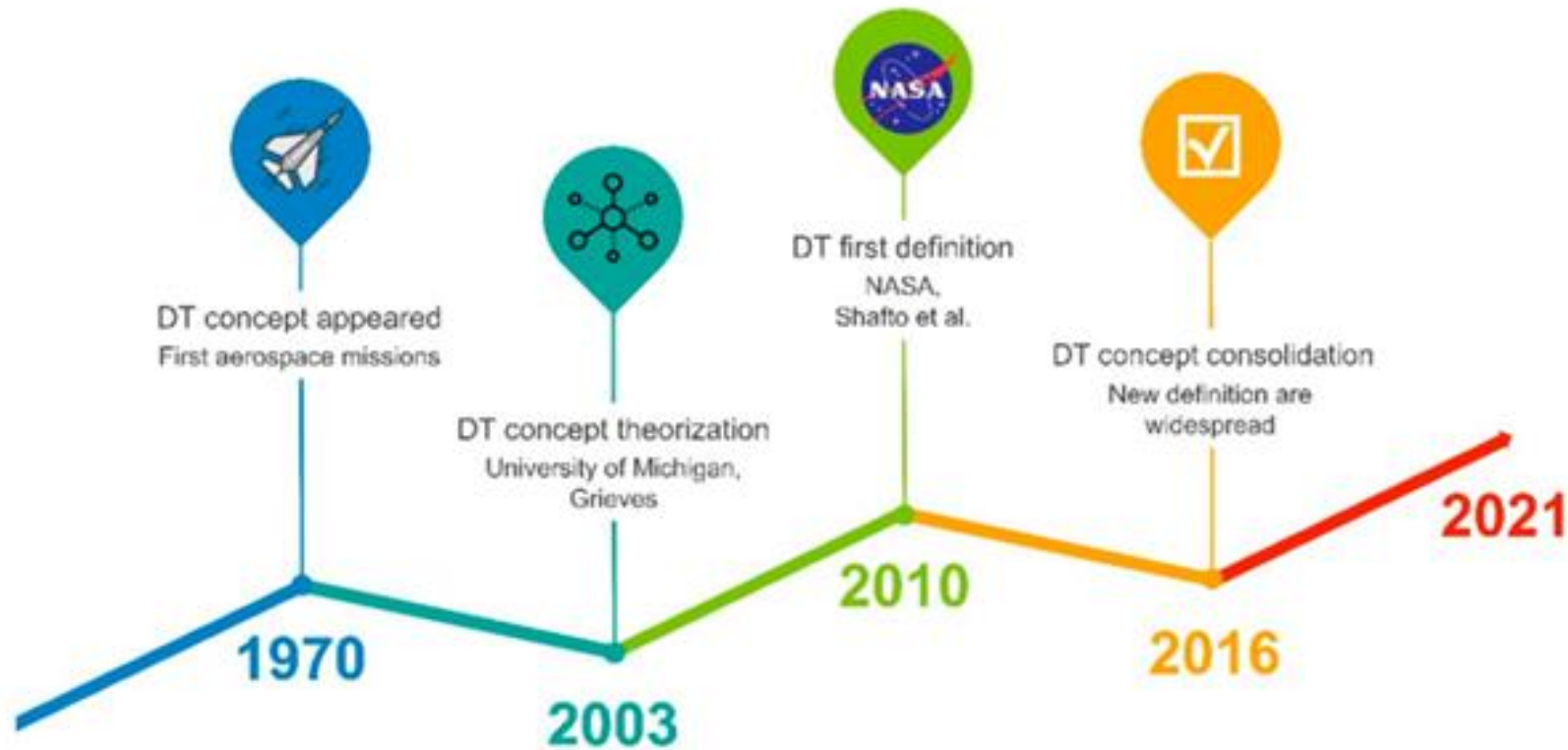
Plus d'informations sur le métaprogramme DIGIT-BIO : <https://www6.inrae.fr/digitbio/>

➤ Emergence du concept et définition



✓ Jumeau numérique : un concept émergent

- Un concept issu de l'industrie et de l'ingénierie apparu dans les années 70...



The timeline of the evolution of the definition of a Digital Twin (DT) (Agnusdei et al., 2021)

- Un intérêt croissant dans le contexte de la transition numérique

✓ Une émergence récente (et rapide) dans le monde de la recherche

- **Dans la littérature**

*Majorité des publications en Sciences de l'ingénieur et TIC
Extension progressive à la biologie, l'alimentation, l'agriculture
et l'environnement*

- **Dans les manifestations scientifiques**

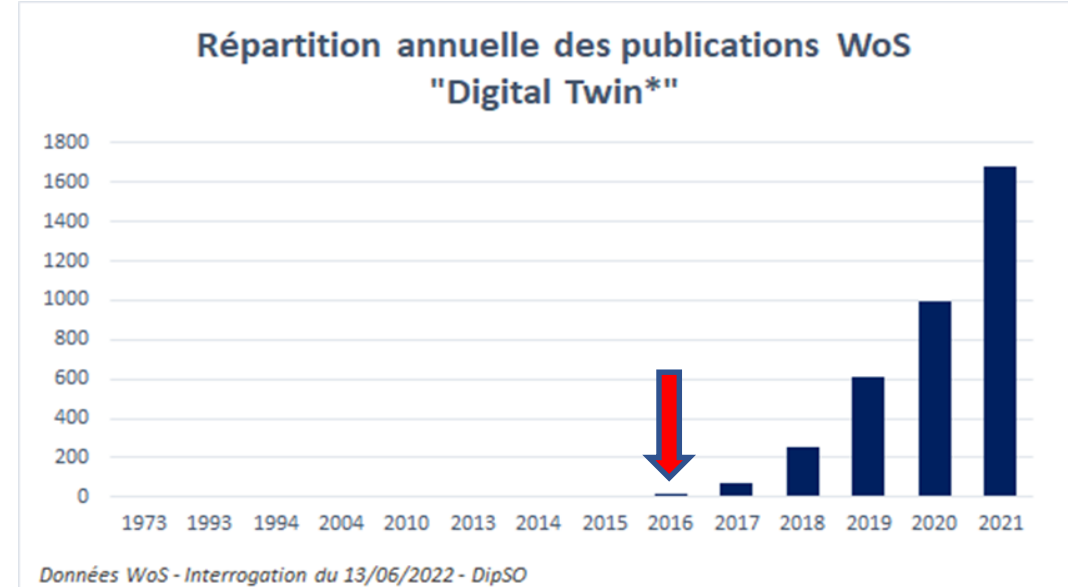
*Séance JN à l'Académie des Technologies (mars 2021)
Colloque JN à Centrale Supélec (février 2023),
Séminaire sur les JN de l'environnement organisé par AllEnvi et
Cap Digital (mars 2023)*

- **Dans les AàPs**

*INFRA-TECH d'Horizon-Europe
AAP européen sur le « virtual digital human twin »*

- **Emergence de projets structurants à grande échelle**

Destination Earth, initiative EU initiée en 2019

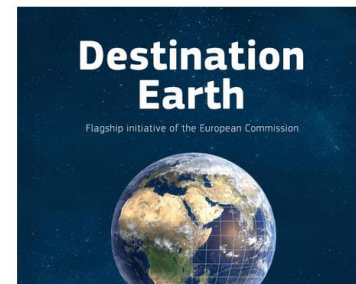


Destination Earth

Destination Earth (DestinE), a European Commission flagship initiative for a sustainable future

The Destination Earth (DestinE) is a flagship initiative of the European Commission to develop a highly accurate digital model of the Earth on a global scale. This model will monitor, simulate and predict the interaction between natural phenomena and human activities. It will contribute to achieving the objectives of the twin transition, green and digital as part of the European Commission's [Green Deal](#) and [Digital Strategy](#).

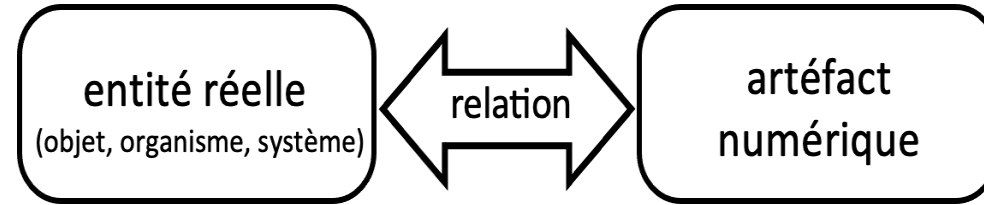
Destination Earth – new digital twin of the Earth will help tackle climate change and protect nature



✓ Jumeaux numériques : les grandes questions

- Définition du jumeau numérique ?
- Quelle distinction entre jumeau numérique et modèle ?
- Conditions de transposition du concept en sciences du vivant ?

✓ Jumeau numérique : de quoi parle t-on ?



Les trois éléments d'un jumeau numérique (D'après Korenhof et al., 2021)

- Plusieurs définitions existent selon le contexte et le domaine d'application

- Définition d'IBM

*Un jumeau numérique est une **représentation virtuelle** d'un objet ou d'un système qui **couvre son cycle de vie**. Il est mis à jour à partir de **données en temps réel** et utilise la **simulation**, l'**apprentissage automatique** et le **raisonnement** pour **faciliter la prise de décision** (<https://www.ibm.com/fr-fr/topics/what-is-a-digital-twin>)*

- Définition du JRC (pour la recherche)

*A digital twin is a **digital replica** of a **living or non-living physical entity**. By bridging the physical and the virtual world, **data** is **transmitted seamlessly** allowing the **virtual** entity to **exist simultaneously** with the **physical** entity (El Saddik, A. 2018, [JRC Technical report](#))*

✓ Jumeaux numériques : 5 caractéristiques (Verdouw et al., 2021 ; Korenhof et al., 2021)

1. **Temporalité** de la relation entre entité réelle et artefact numérique

Mesures fréquentes de l'état de l'entité réelle / MAJ dynamiques de l'artefact numérique

Synchronisation à **moyenne ou haute fréquence**, voire **en temps réel** ;

2. **Fidélité**, voire **haute-fidélité de la représentation numérique**, une condition nécessaire pour envisager une rétroaction vers l'entité réelle) ;

3. **Capacité prédictive** de l'artefact numérique

Intégration dynamique des mesures de l'entité réelle dans l'artefact numérique

Bonne prise en compte dans les modèles et algorithmes de la complexité de la structure et des comportements de l'entité réelle

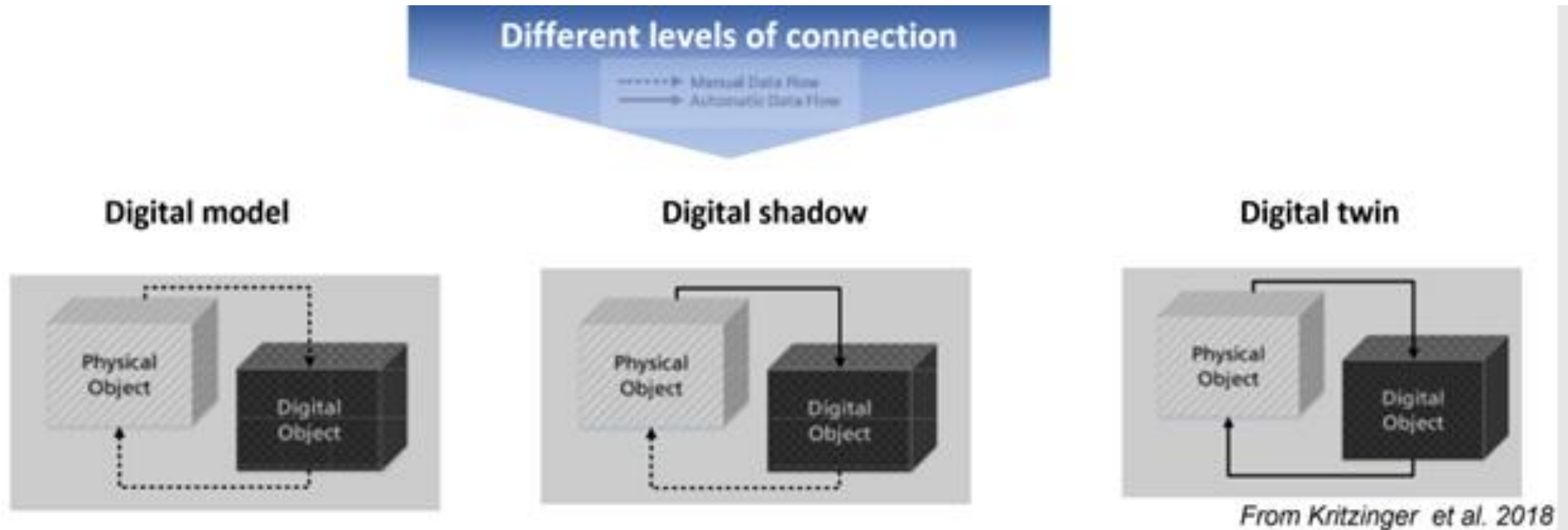
4. **Capacité prescriptive** de l'artefact numérique

Diagnostic dynamique, mesure de la performance, optimisation, recommandations, surveillance, détection d'anomalies, alertes ;

5. **Rétroaction** (dynamique) de l'artefact numérique sur l'entité réelle

Via une **aide à la décision** de l'opérateur humain et/ou *via* un **pilotage direct** de celle-ci (de type automate)

✓ Jumeau numérique, modèle, automate : quelle distinction ?



Pas d'échange automatisé (ou régulier) de données entre l'entité réelle et l'artéfact numérique

Flux de données unidirectionnel automatisé entre l'entité réelle et l'artéfact numérique
Un changement d'état de l'entité réelle entraîne un changement d'état de l'artéfact numérique

Flux de données bidirectionnel entre l'entité réelle et l'artéfact numérique
Un changement d'état de l'entité réelle entraîne un changement d'état de l'artéfact numérique **et inversement**

Kritzing et al. (2018)

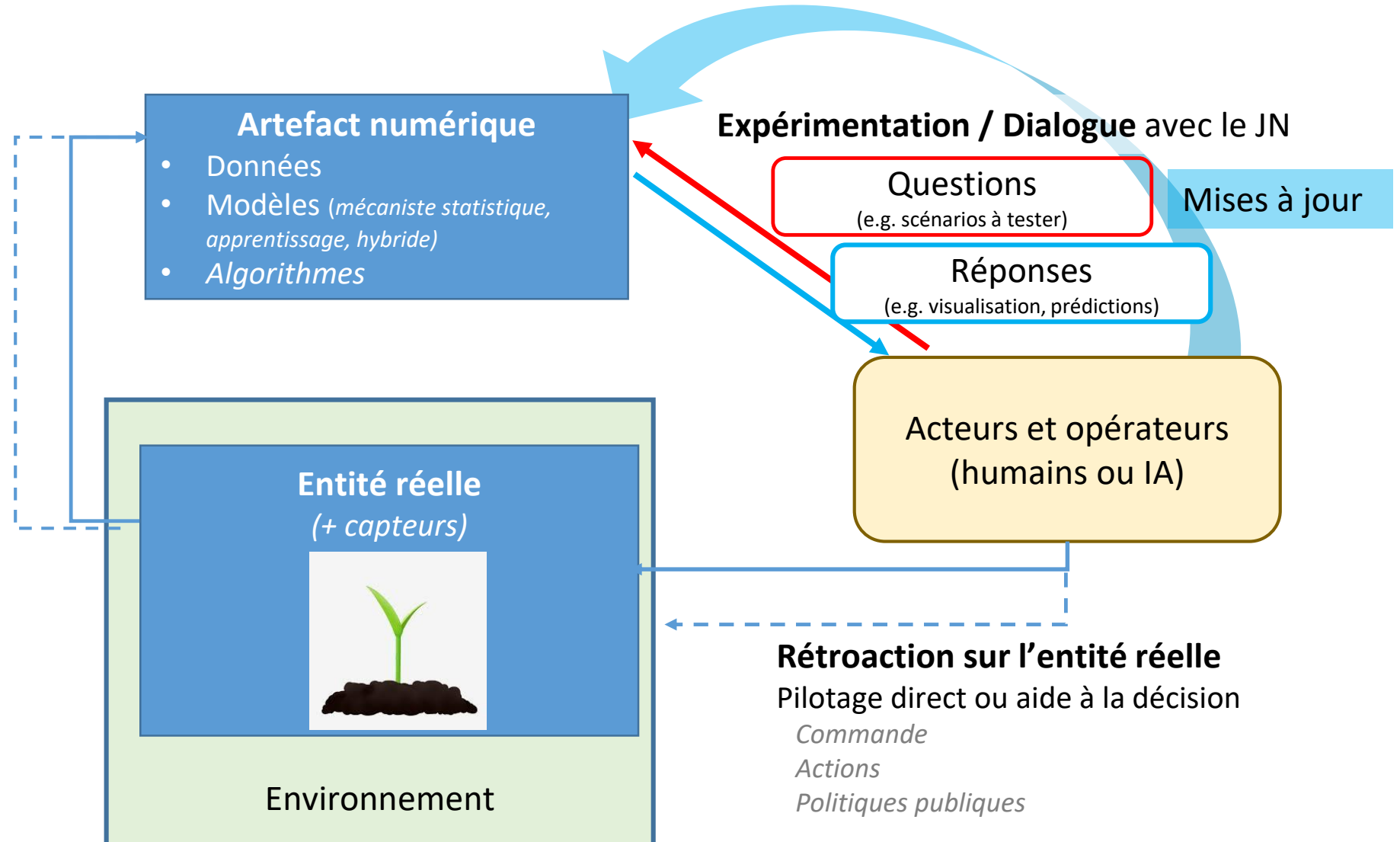
✓ Jumeaux numériques : proposition des auteurs

Flux de données

Mesures multi-sources

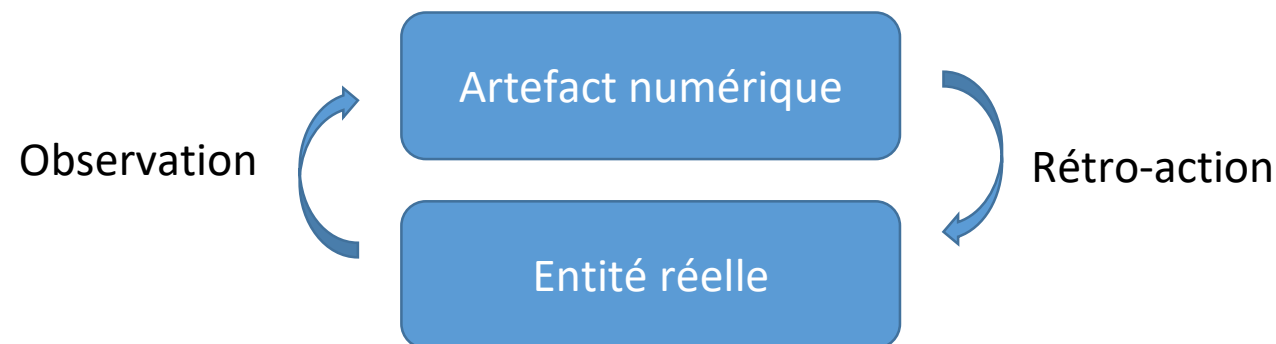
Temporalité

Objectif de synchronisation
≈ Moyenne, haute fréquence
voire Temps réel



✓ Un jumeau numérique se distingue d'un modèle classique par:

1. Un changement d'échelle (complexité de l'objet et de sa représentation virtuelle) nécessitant un saut technologique : présence d'un environnement virtuel permettant de travailler sur l'artefact numérique selon plusieurs points de vue et plusieurs dimensions par rapport à des simulations standards.
2. Un flux de données bidirectionnel de l'objet réel vers sa représentation virtuelle en temps réel ou haute fréquence par rapport à la dynamique du système
3. Une finalité d'actions concrètes sur le système réel : rétroaction sur le même objet



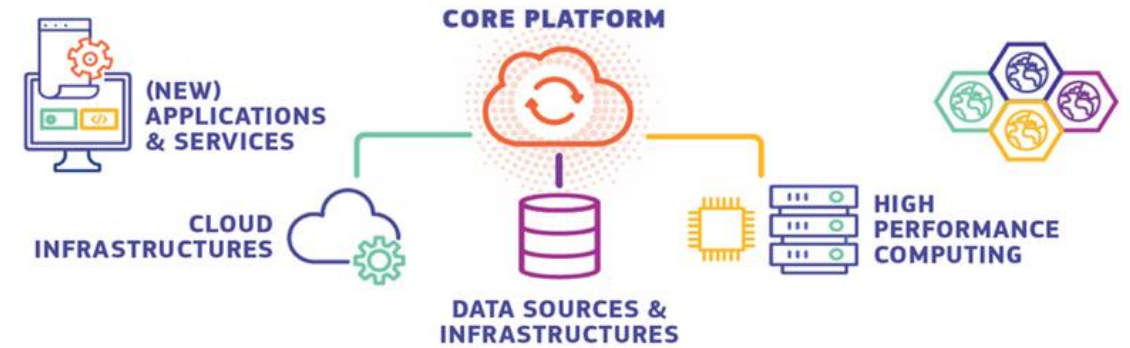
➤ Exemples de projets



✓ Destination Earth : un modèle numérique de la terre

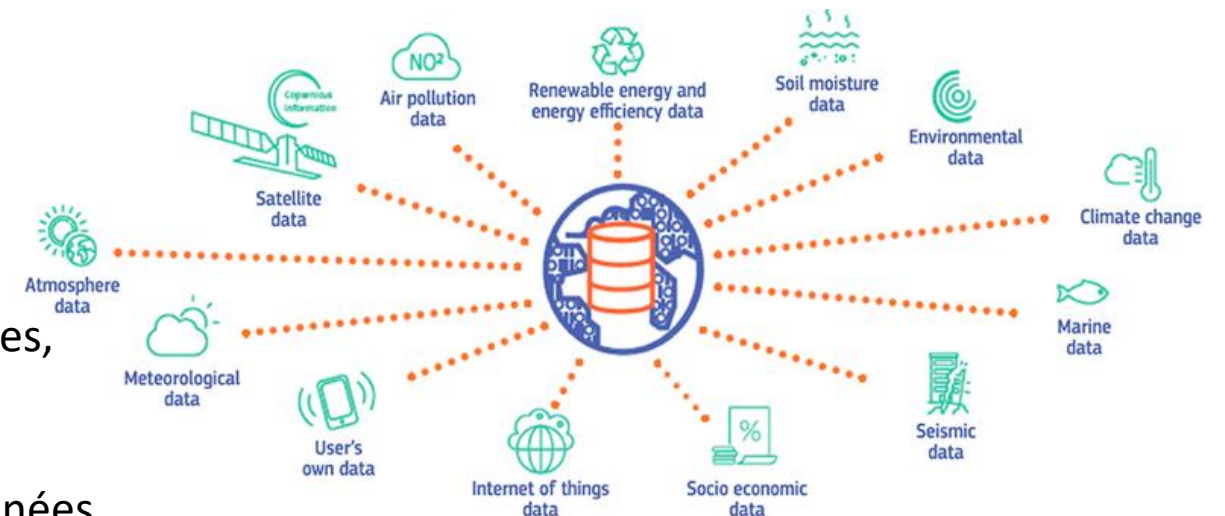


- Se préparer à réagir aux catastrophes naturelles majeures, s'adapter au changement climatique et prévoir l'impact socio-économique.
- Un élément clé de la stratégie européenne pour les données en consolidant l'accès dans toute l'Europe



Organisation générale de DestinE

(<https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/library/destination-earth>)



Lac de données de DestinE

(<https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/library/destination-earth>)

✓ Agriculture : stratégie WUR

Introducing digital twins to agriculture

Christos Pylianidis*, Sjoukje Osinga, Ioannis N. Athanasiadis

Wageningen University and Research, the Netherlands

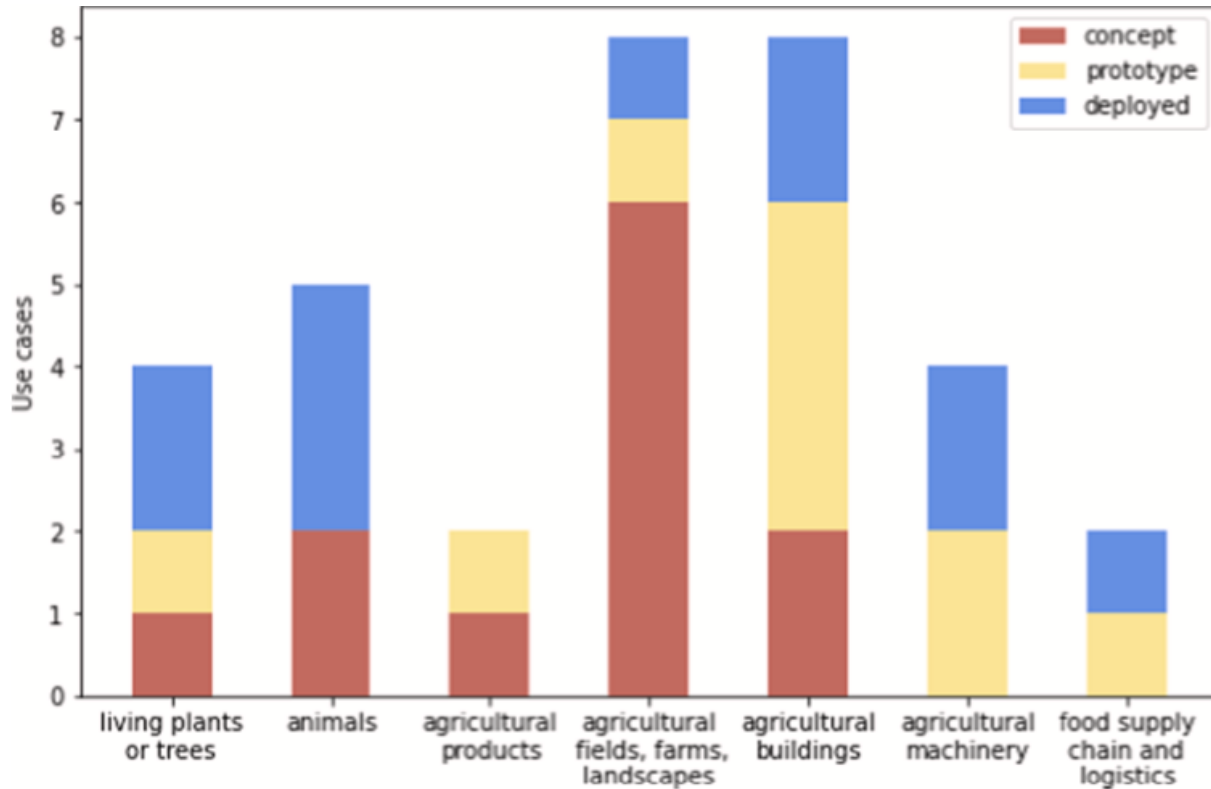


Figure. Cas d'applications des jumeaux numériques en agriculture. La couleur indique le niveau de TRL (Pylianidis et al. (2021))

✓ Agriculture : stratégie WUR

Introducing digital twins to agriculture

Christos Pylianidis*, Sjoukje Osinga, Ioannis N. Athanasiadis

Wageningen University and Research, the Netherlands

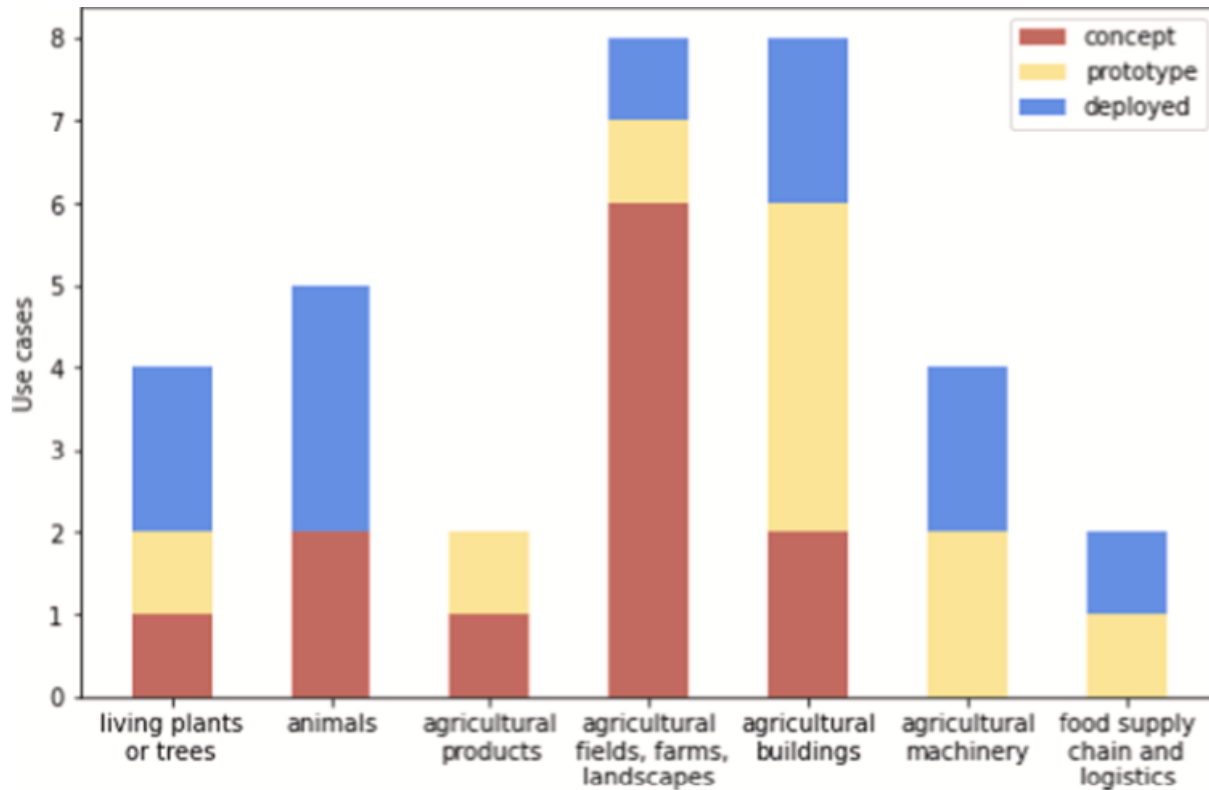
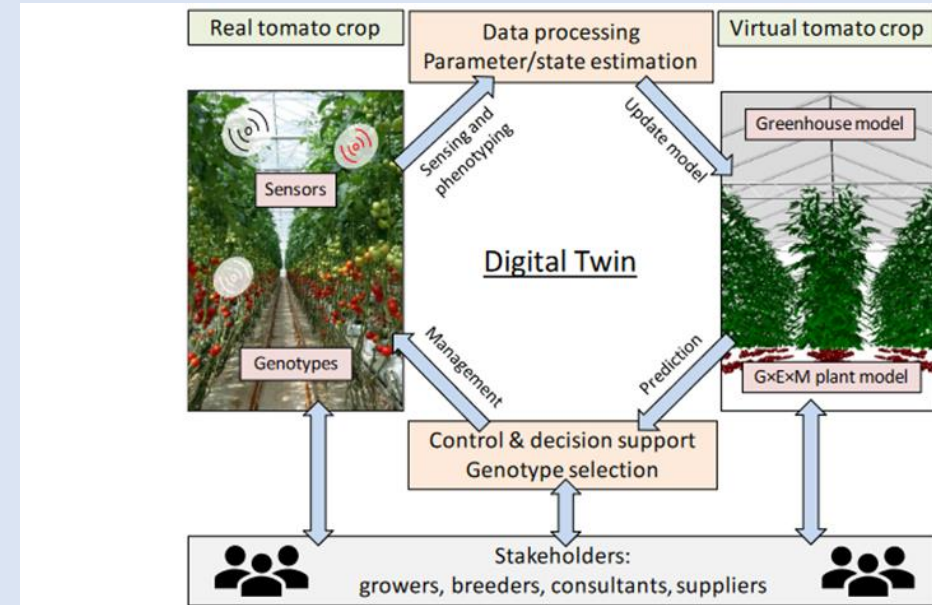


Figure. Cas d'applications des jumeaux numériques en agriculture. La couleur indique le niveau de TRL (Pylianidis et al. (2021))

Digital Twin « Virtual Tomato Crops »

Un modèle de prédiction de la croissance des plants de tomates en 3D sous serre



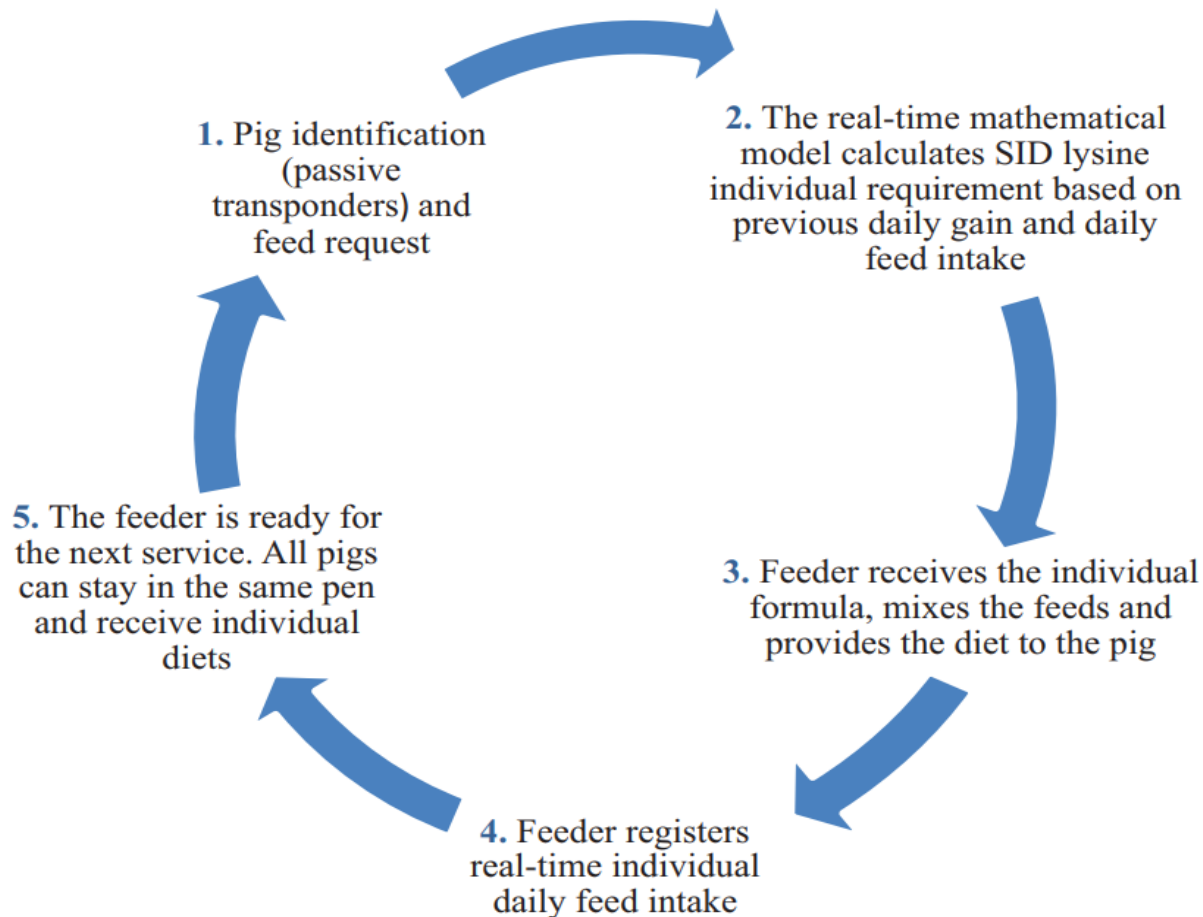
Concept map of the Virtual Tomato Crops digital twin. (GxExM = interaction between genotype, environment and management)

Figure. Schéma du jumeau numérique « Virtual Tomato Crops » (source : <https://www.wur.nl/en/project/virtual-tomato-crops-1.htm>)

✓ Elevage: alimentation de précision

Alimentation de précision pour les porcs en croissance

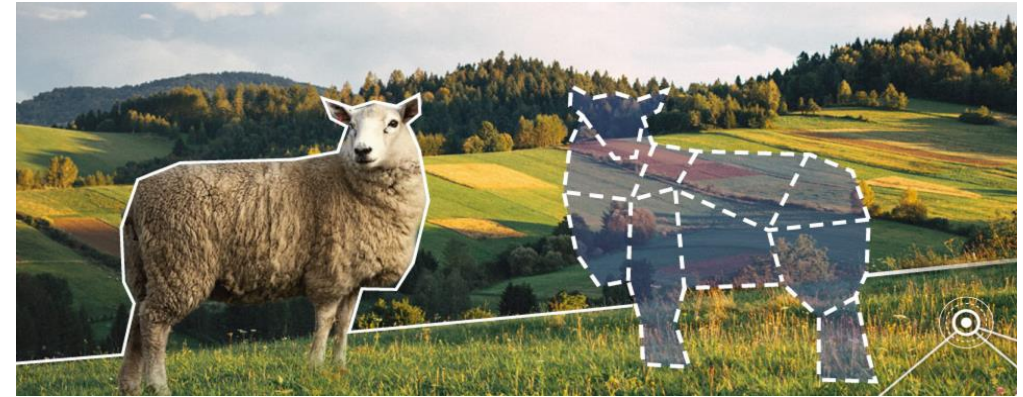
Pomar and Ramus (2019)



- Ajustement de ratio en fonction de besoin de chaque animal
- Modèle de besoin nutritionnel en fonction de l'ingestion et le poids
- Suivi personnalisée

=> Vers un jumeau numérique pour la construction d'une alimentation sur mesure

✓ Transposition en sciences du vivant



➤ Un challenge spécifique

⇒ Complexité et enjeux scientifiques: interactions, rétroactions, régulations, plasticité, multi-échelle, ...

⇒ Des enjeux éthiques : reconnaissance de la variabilité inter-individuelle mais

- Vers une artificialisation du vivant? « jumeau » un terme illégitime en biologie? Représentation ou normalisation?
- Enjeux sur les données: propriété, contrôle, risques de biais
- Suivi individuel: acceptabilité des capteurs, consentement nécessaire, besoin d'évaluation bénéfice/risque

⇒ Des enjeux sociétaux et d'image :

- Vision technologique du vivant et de l'agriculture, conséquences environnementales, enjeux de pouvoir, ...
- => à associer à une démarche de recherche et innovation responsable

➤ Un sujet abordé dans la littérature et lors du séminaire DIGIT-BIO (*Datta, 2017; Batty, 2018 ; Wright & Davidson, 2020 ; Popa et al., 2021 ; van der Burg et al., 2021 ; Tomko & Winter, 2021; Korenhof et al., 2021; Helbing & Sánchez-Vaquerizo, 2022*)

=> Nécessité d'une réflexion sur l'usage du concept pour les sciences du vivant

➤ Les jumeaux numériques à INRAE



✓ Jumeaux numériques : quelle démarche à INRAE ?

- **Mise en place d'un groupe de travail « jumeaux numériques » (avril 2022)**

Michael Chelle, Masoomeh Thaghipoor, Fabien Jourdan, Hervé Monod, Marjorie Domergue, Carole Caranta et Irène Vignon Clémentel (INRIA)

- ✓ Synthèse bibliographique et enquête auprès des Chefs de département INRAE (été 2022)
 - ✓ Organisation d'une matinée d'échanges « Jumeaux numériques » dans le cadre du séminaire du métaprogramme DIGIT-BIO (décembre 2022)
 - ✓ Présentation au Conseil Scientifique INRAE et préparation d'un rapport
-
- **Des projets en émergence**
 - ✓ Des projets existants dans le domaine de la transformation des produits (département TRANSFORM) et de la robotique
 - ✓ Appel à idées du Métaprogramme DIGIT-BIO, élargi à l'ensemble des domaines de recherche d'INRAE (démarrage des projets en 2024)
 - ✓ Des actions incitatives à venir

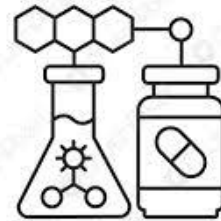
✓ Quelques exemples de sujets potentiels à INRAE



Elevage

Alimentation sur mesure

Transmissibilité génétique de caractères
Dynamiques de diffusion de maladies



Génie des procédés, biotechnologies blanches

Pilotage de bioréacteurs

Nage de bactéries dans des biofilms
Performances techniques stations d'épuration



Productions végétales

Métabolisme cellulaire des plantes
Système plante-pathogène-mycorhize
Dynamique des peuplements forestiers



Robotique, chaîne de production, IAA

Extrusion pour la valorisation des légumineuses
Détermination et gestion du risque de contamination biologique sur une ligne de production
Chaîne du froid
Interactions de robots avec leur environnement ou avec l'homme



Biologie, santé

Réplication du prion
Prédictions de flux métaboliques
Modèles de cellules à visée thérapeutique
Nutrition et microbiote virtuels



Environnement

Dynamique de communautés écologiques
Modélisation hydrologique bassins versants

(source enquête auprès des Chefs de département INRAE)

✓ Conclusion

Jumeaux numériques : derrière un effet de mode, de vraies questions pour la recherche conduite à Inrae

- De nouvelles questions scientifiques et d'ingénierie dans nos domaines
- Enjeux pour les équipes et les infrastructures de recherche
- Des enjeux d'impact de nos activités

Des problématiques de nature diverses selon les domaines d'application

- En sciences du vivant : des outils et services à développer de façon intégrative pour un suivi individualisé
- En science de l'environnement : des projets à grande échelle permettant de rassembler de nombreux partenaires (CF Destin Earth)

A INRAE, la volonté de se positionner sur le sujet en étant :

⇒ proactifs (actions incitatives internes)

⇒ attentifs aux enjeux éthiques