Optimisation de l'utilisation des énergies renouvelables

UN JUMEAU NUMÉRIQUE POUR LES MICROGRILLES

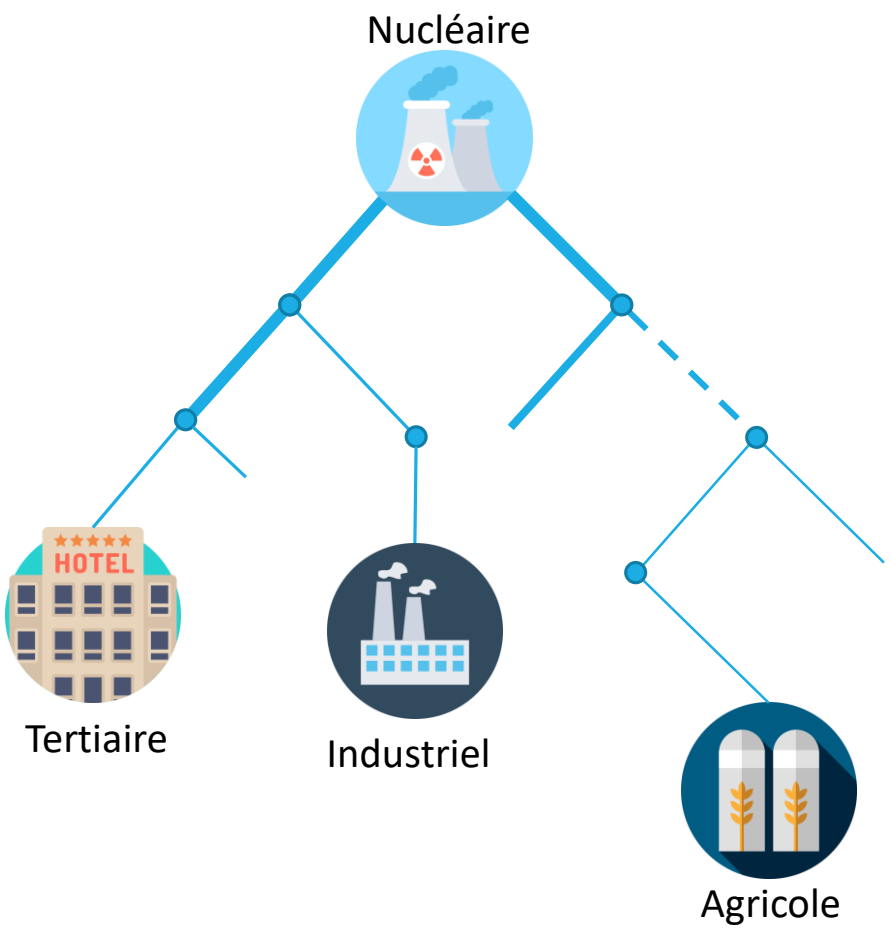
Jury

Pr. Sébastien MOSSER,	Rapporteur,	UNIVERSITE DU QUEBEC MONTREAL
Dr. Sébastien GÉRARD,	Rapporteur,	COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE
Pr. Reda BENDRAOU,	Examinateur,	UNIVERSITE PARIS NANTERRE
Dr. Anne-Cécile ORGERIE,	Examinatrice,	CNRS
Pr. Olivier BARAIS,	Directeur,	UNIVERSITE DE RENNES 1
Dr. Yoann MAUREL,	Encadrant,	UNIVERSITE DE RENNES 1

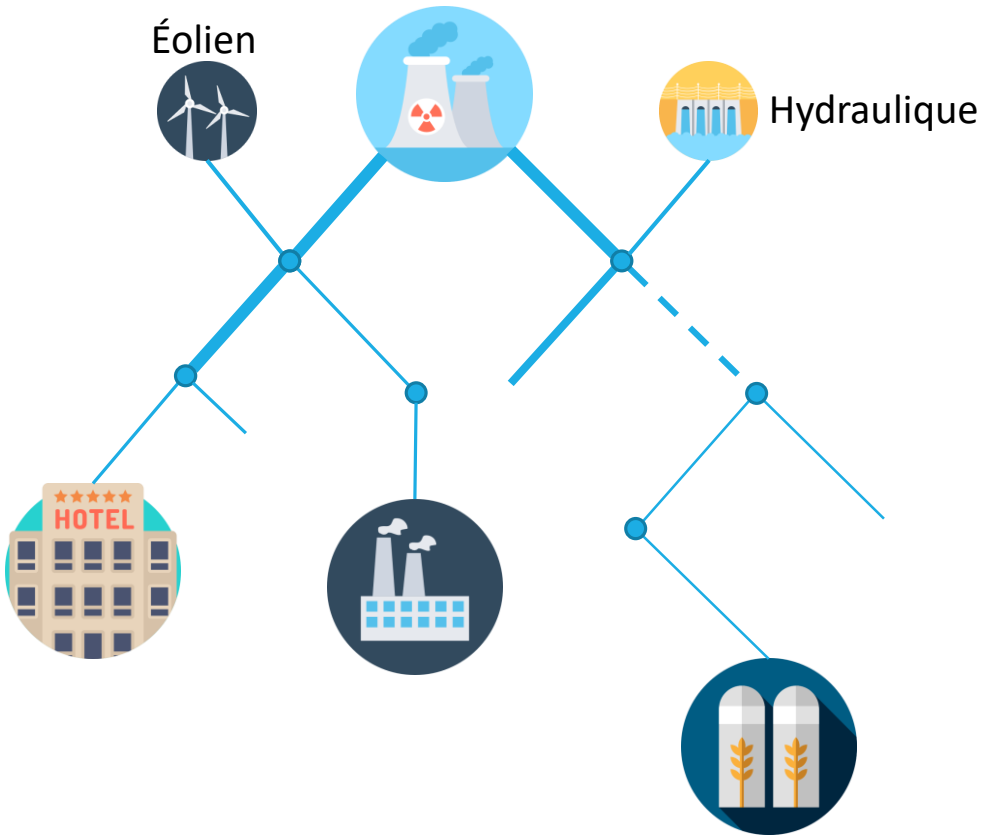
Invité

Valentin MAURICE,	Responsable R&D,	OKWind

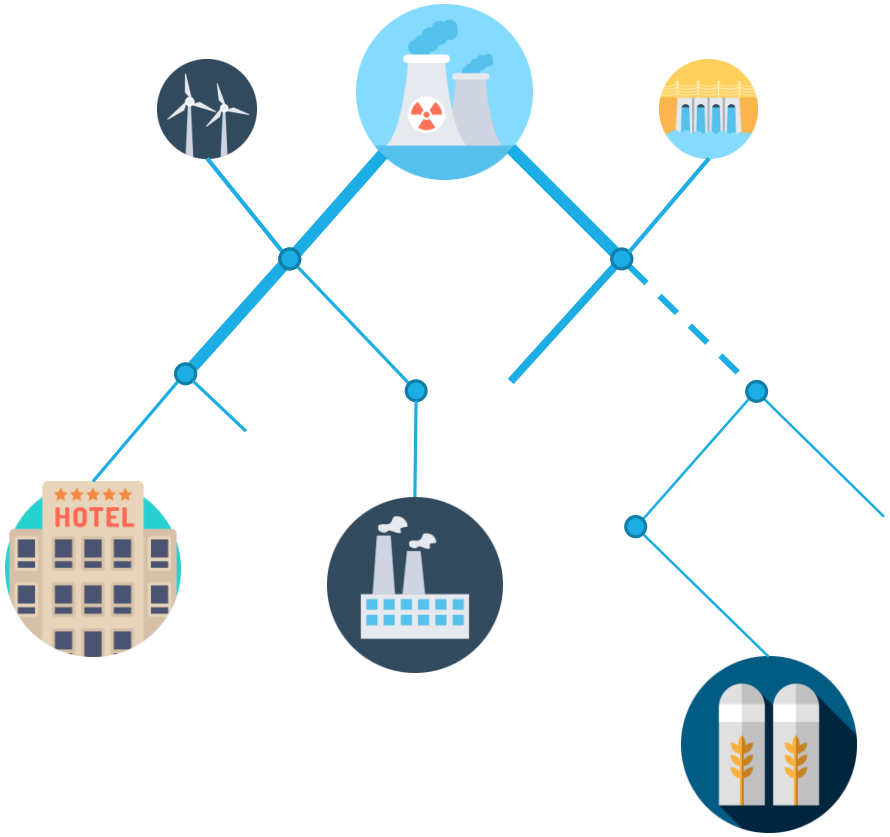
Grille: historiquement centralisée



Grille: historiquement centralisée

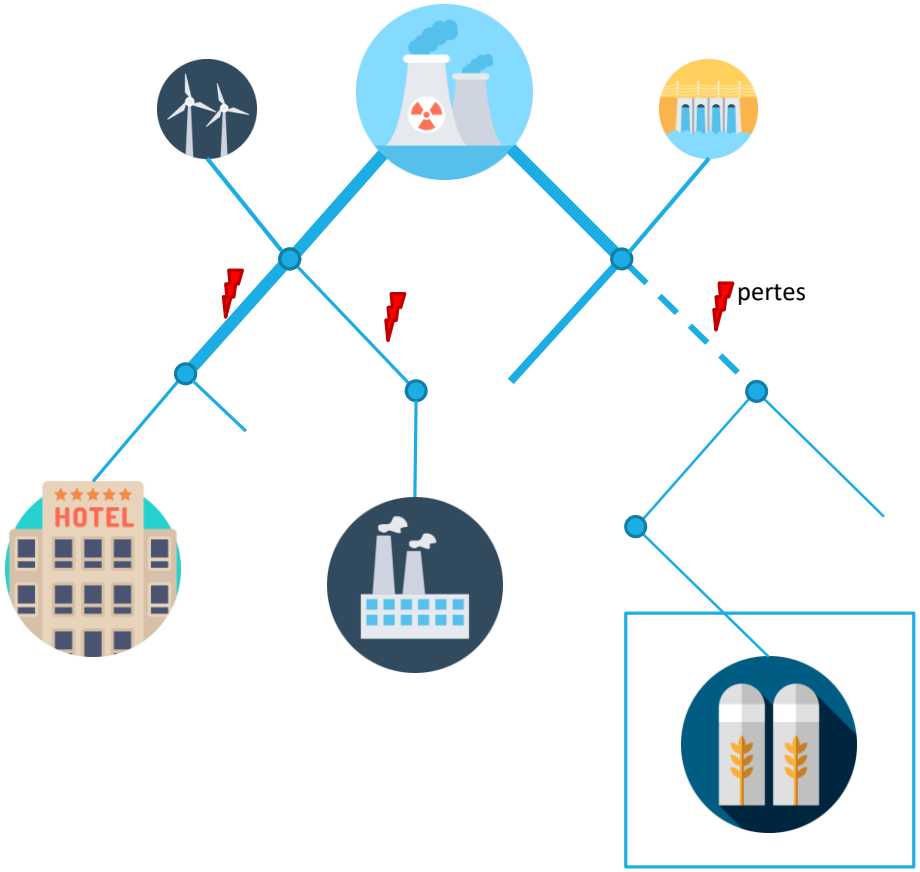


Grille: équilibre



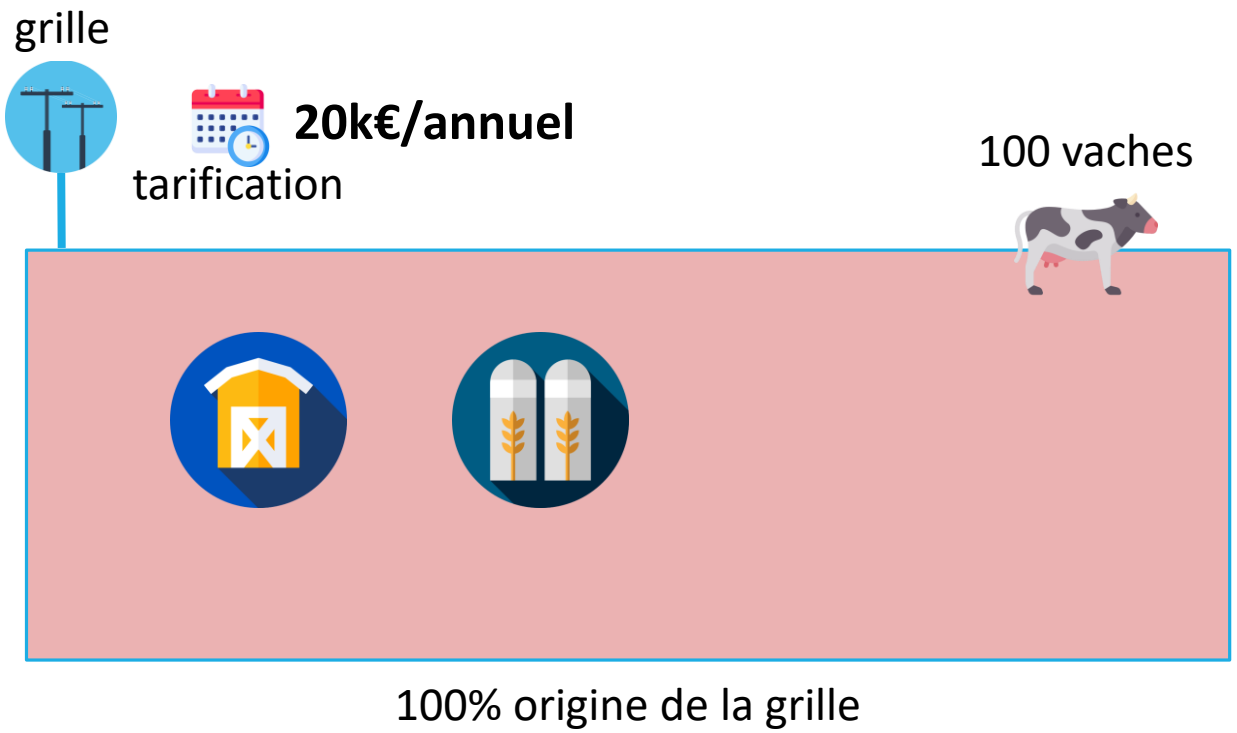
Heures pleines
Heures creuses

Grille: pertes en ligne

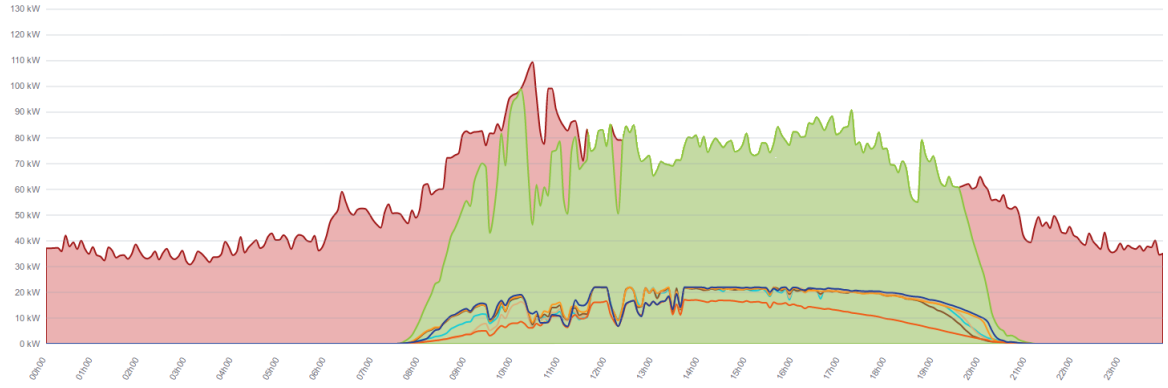


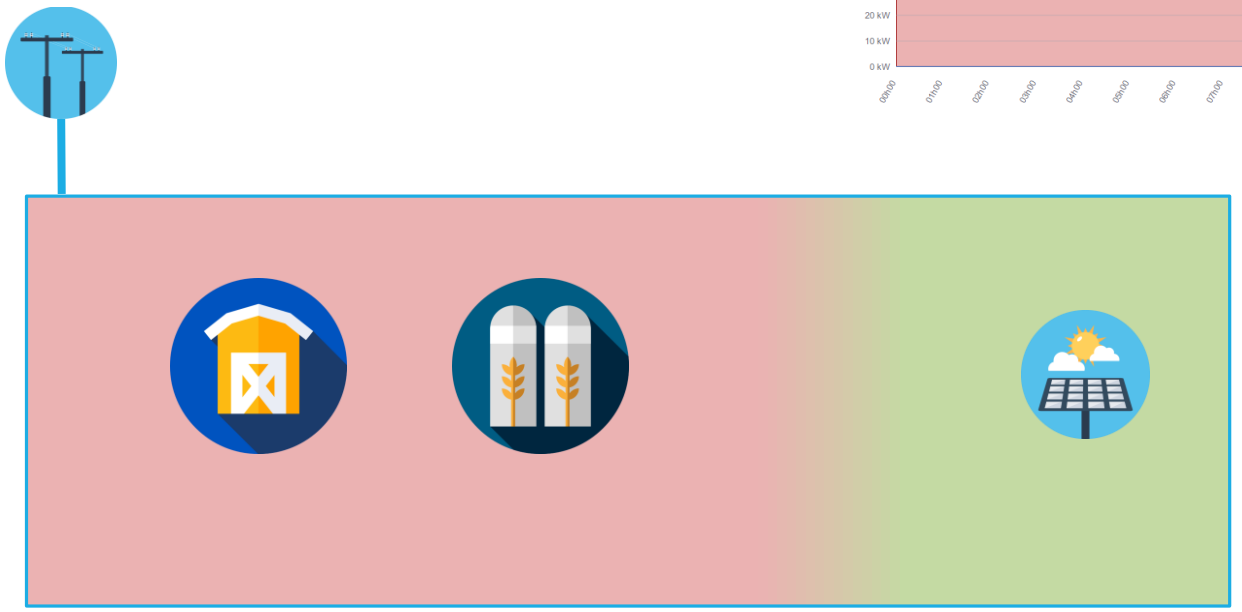
Cas d’étude : microgrille agricole

Électricité: un des premiers postes de dépense



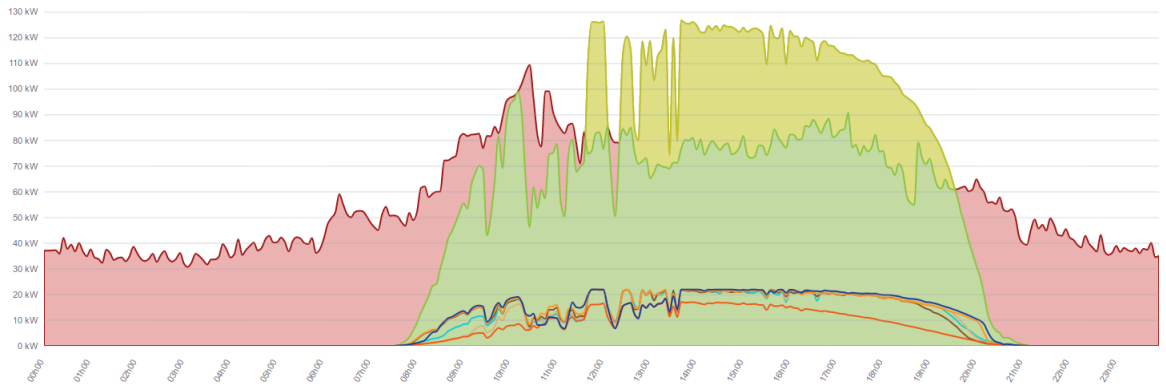
Microgrille agricole : dimensionnement

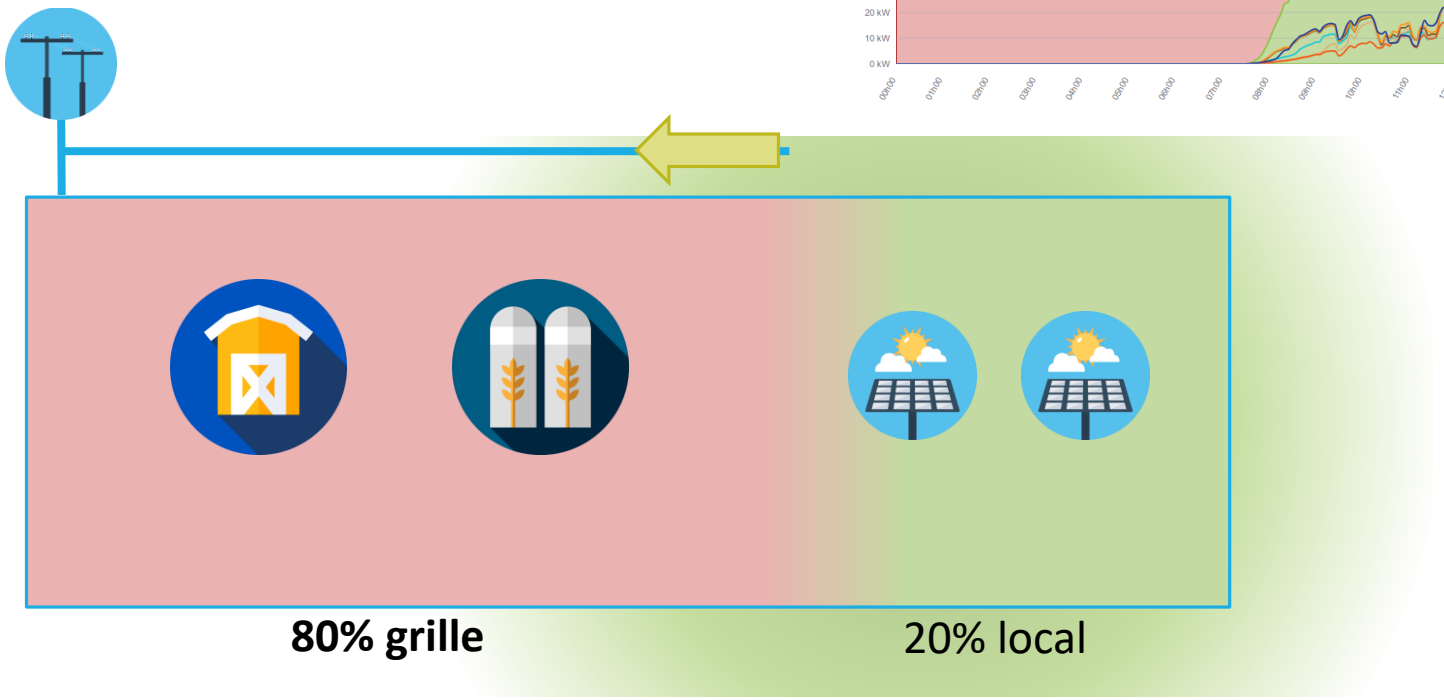




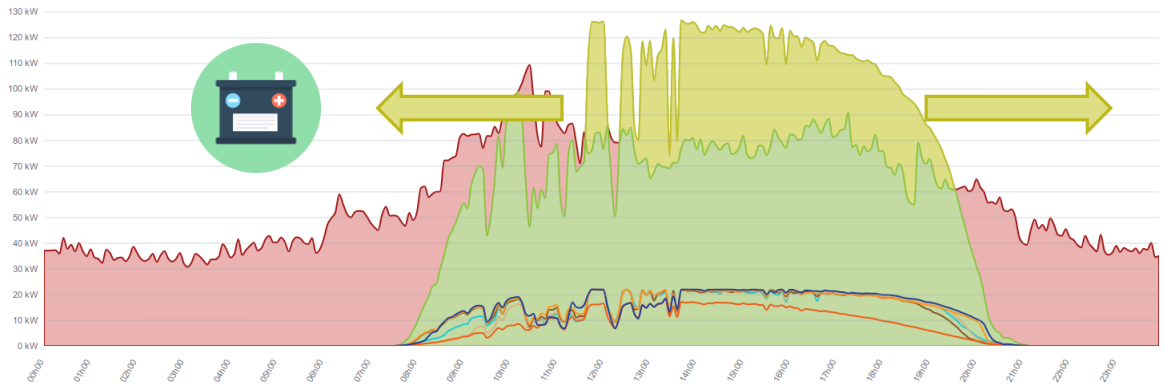
80% grille 20% local

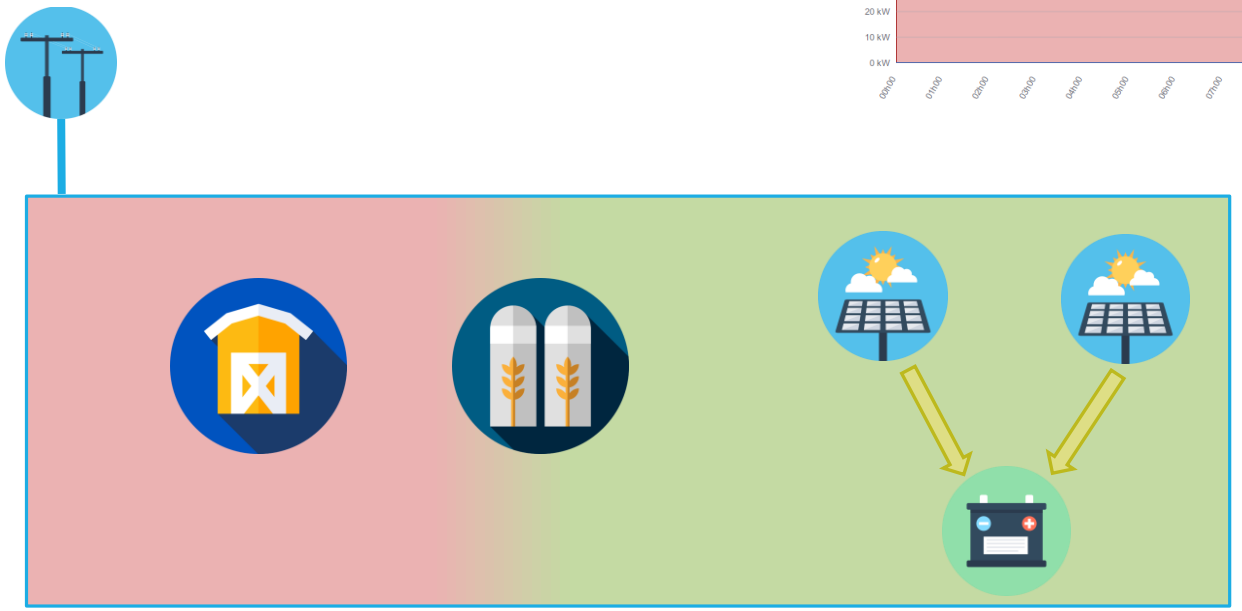
Microgrille agricole : dimensionnement





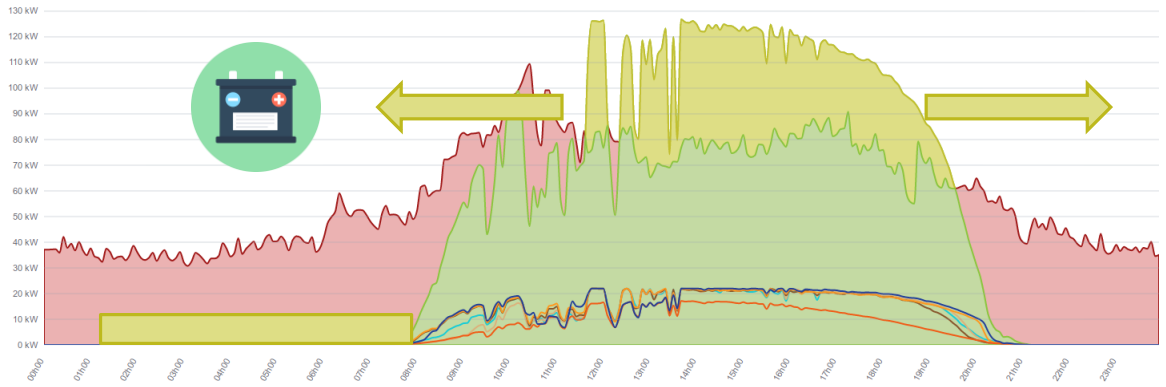
Microgrille agricole : dimensionnement

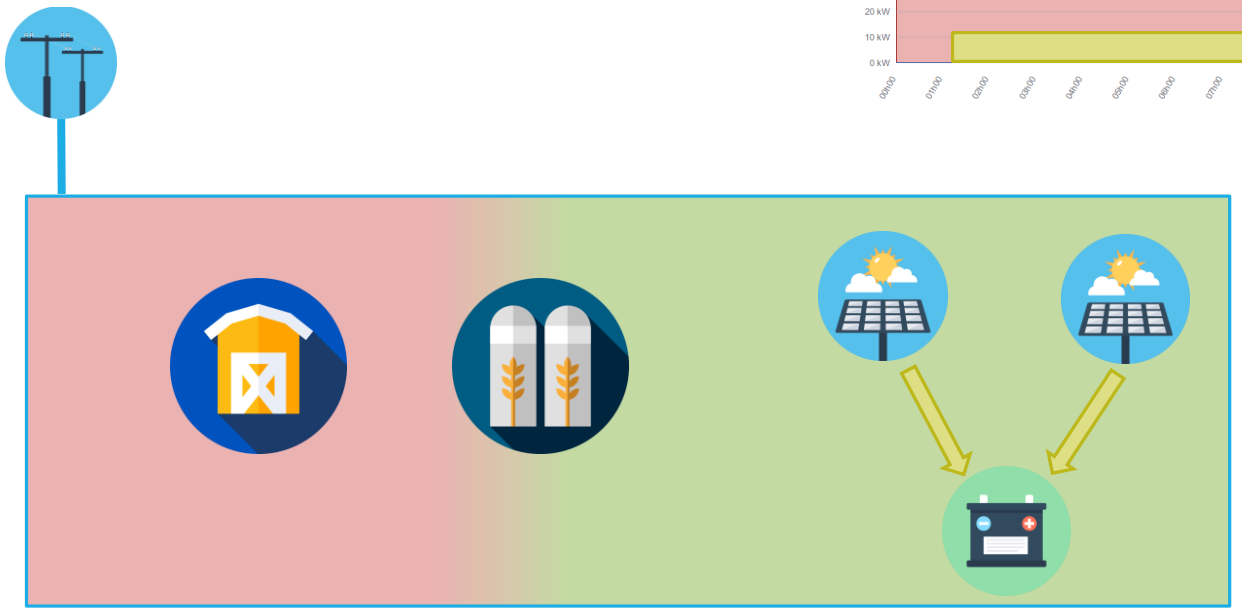




40% grille 60% local

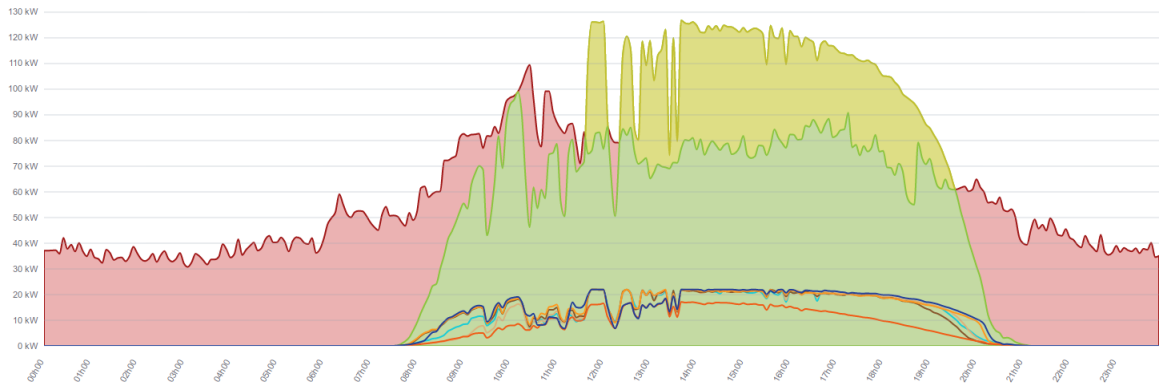
Microgrille agricole : dimensionnement



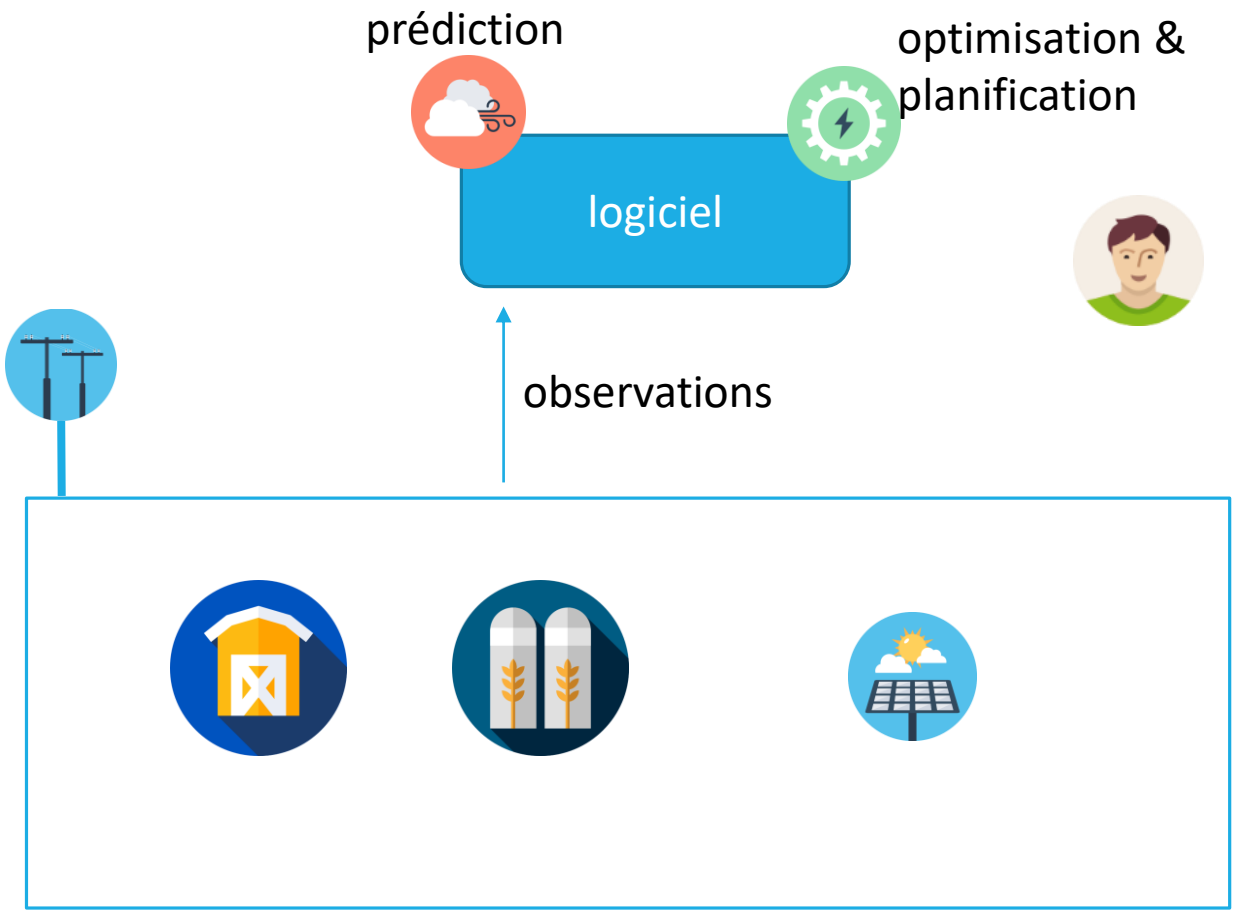


40% grille 60% local

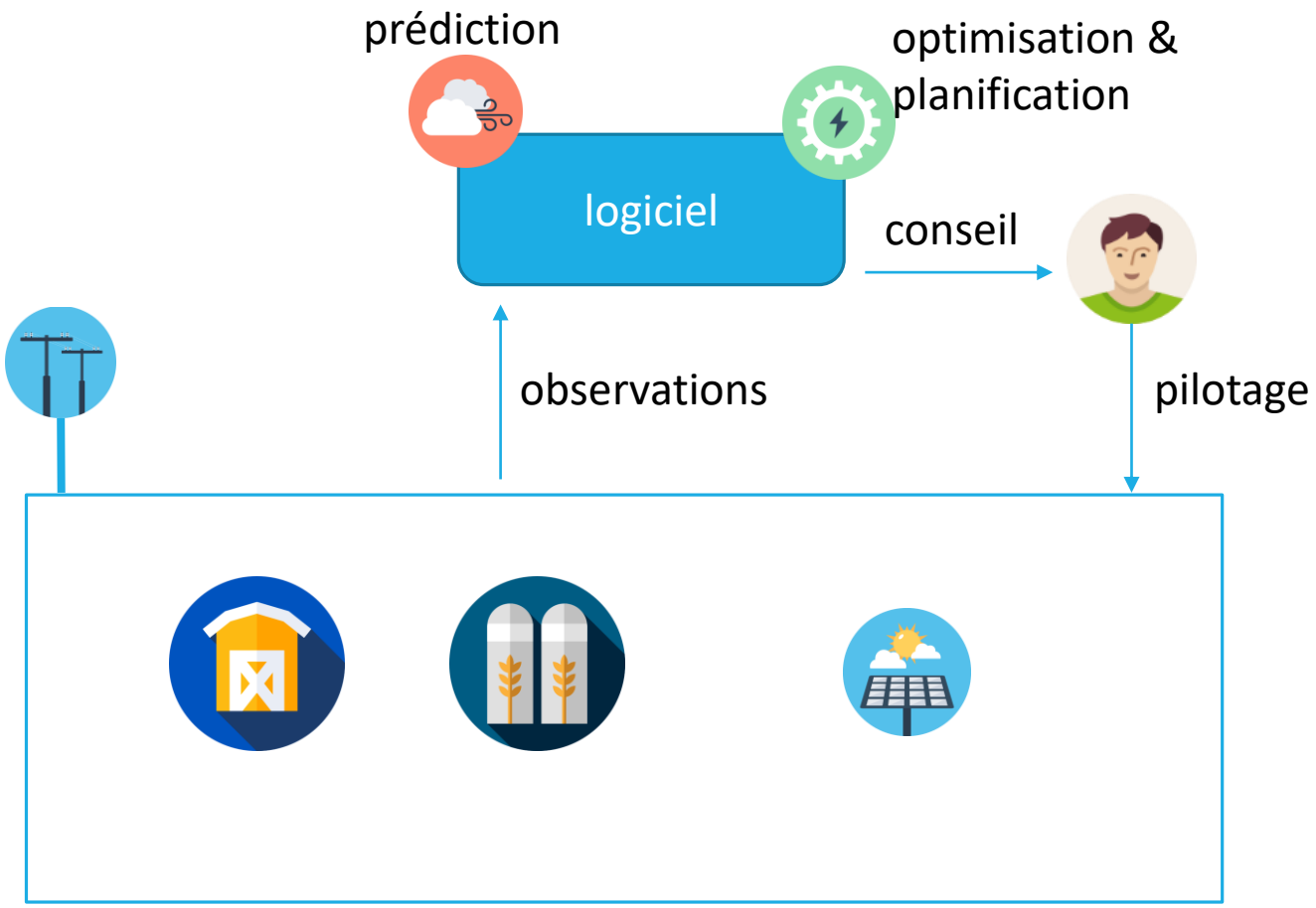
Microgrille agricole : dimensionnement



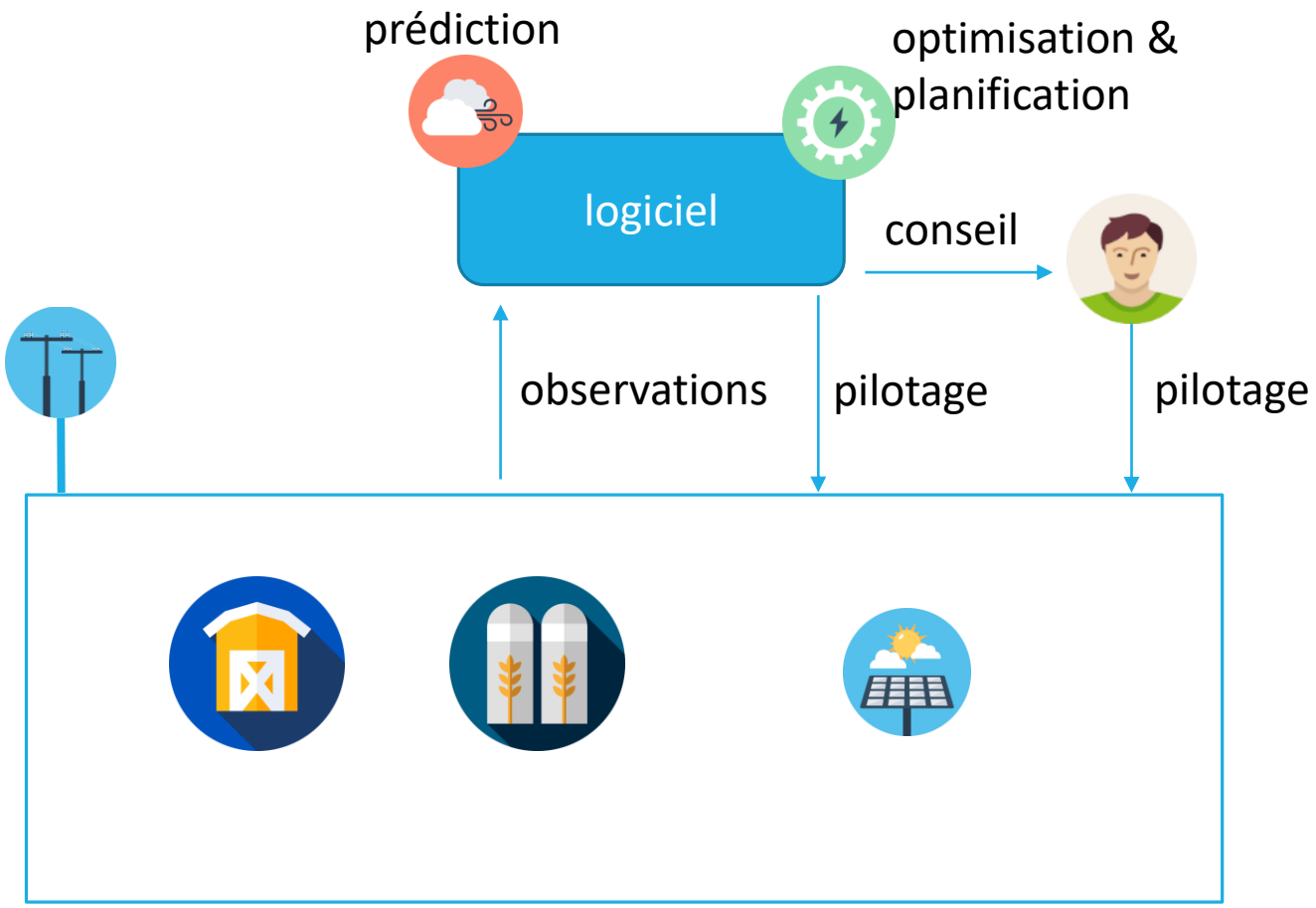
Vision : microgrille agricole



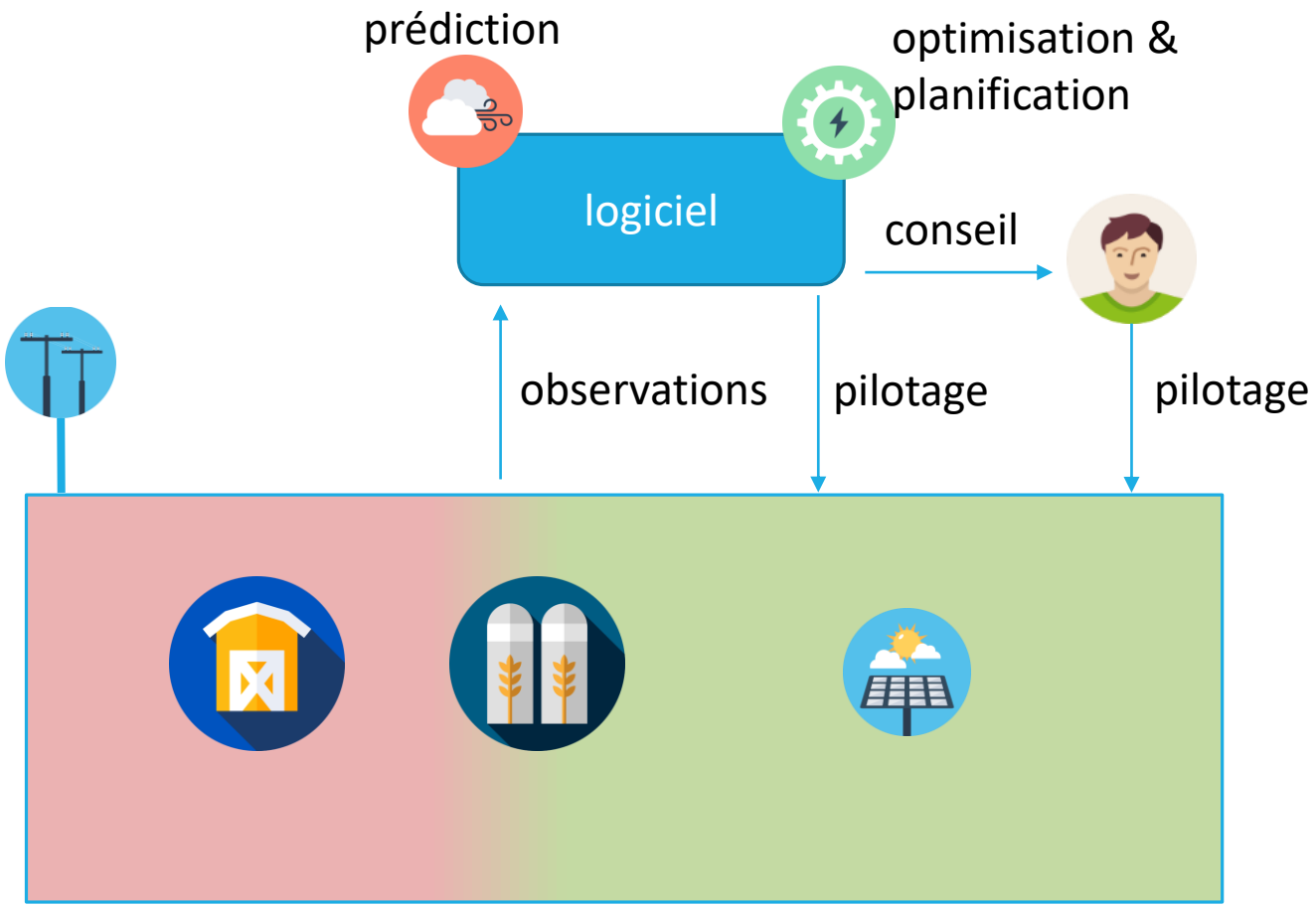
Vision : microgrille agricole

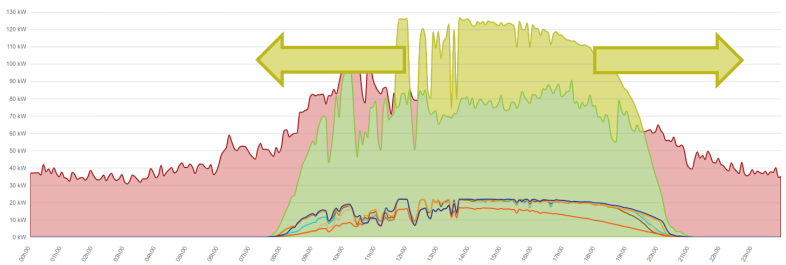


Vision : microgrille agricole



Vision : microgrille agricole





Secteurs d'application

Tertiaire

Diversité des activités

Peu de place pour batteries

Industriel

Diversité des machines

Agricole

Diversité des secteurs

Hétérogénéité des technologies et des process

Secteurs d'application

Tertiaire

Diversité des activités

Peu de place pour batteries

Industriel

Diversité des machines

Agricole

Diversité des secteurs

approche générique

Partenariat industriel: OKWind

Moyens de production locaux

Bureau d’étude

Conseil en efficacité énergétique

Cas d’usage agricoles

Besoins du domaine

- **Dimensionnement** des moyens de production et de stockage de l'énergie

- **Optimisation** de la consommation

- **Pilotage du matériel/ conseil** aux usagers

Industriel:

- **Utilisation accessible** à une entreprise

Domaine : état de la pratique

Experts à OKWind :

- **Technicien**: expérience dans le dimensionnement
- **Ingénieure agricole**: expert dans les activités

Domaine : état de la pratique

Experts à OKWind :

- **Technicien**: expérience dans le dimensionnement
- **Ingénieure agricole**: expert dans les activités

plusieurs services tiers, outils et tableurs
Évolution très difficile, peu consistant, source d'erreurs

Questions de recherche

Optimisation de l’utilisation des énergies renouvelables

Comment optimiser le mix énergétique local ?

Questions de recherche

Comment optimiser le mix énergétique local ?

1. Quelles sont les bonnes **abstractions** ?

2. Comment **simuler** le comportement d'une microgrille ?

3. Comment **optimiser** l'usage des énergies renouvelables ?

4. Comment appliquer ces optimisations (**conseil/pilotage**) ?

L'Ingénierie Dirigée par les Modèles ?

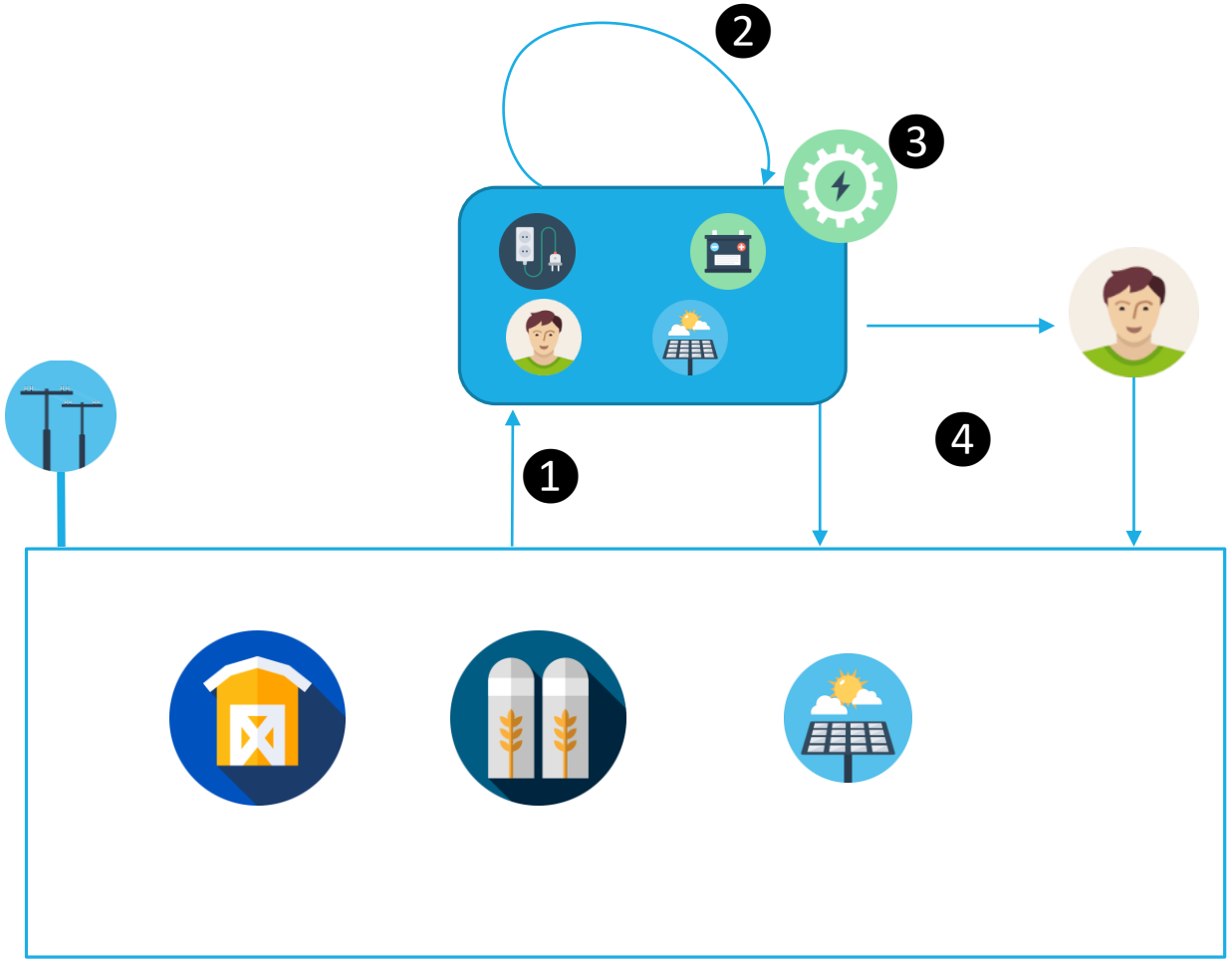
Plan de cette soutenance

- Contexte : la gestion de l'énergie
- Existants: Gestionnaires d'énergie
- Proposition : Un Jumeau Numérique pour les microgrilles
- Réalisation : RegulDSL
- Validation : Optimisation d'un cas industriel
- Conclusion & perspectives : au-delà de l'électricité

État de l’art

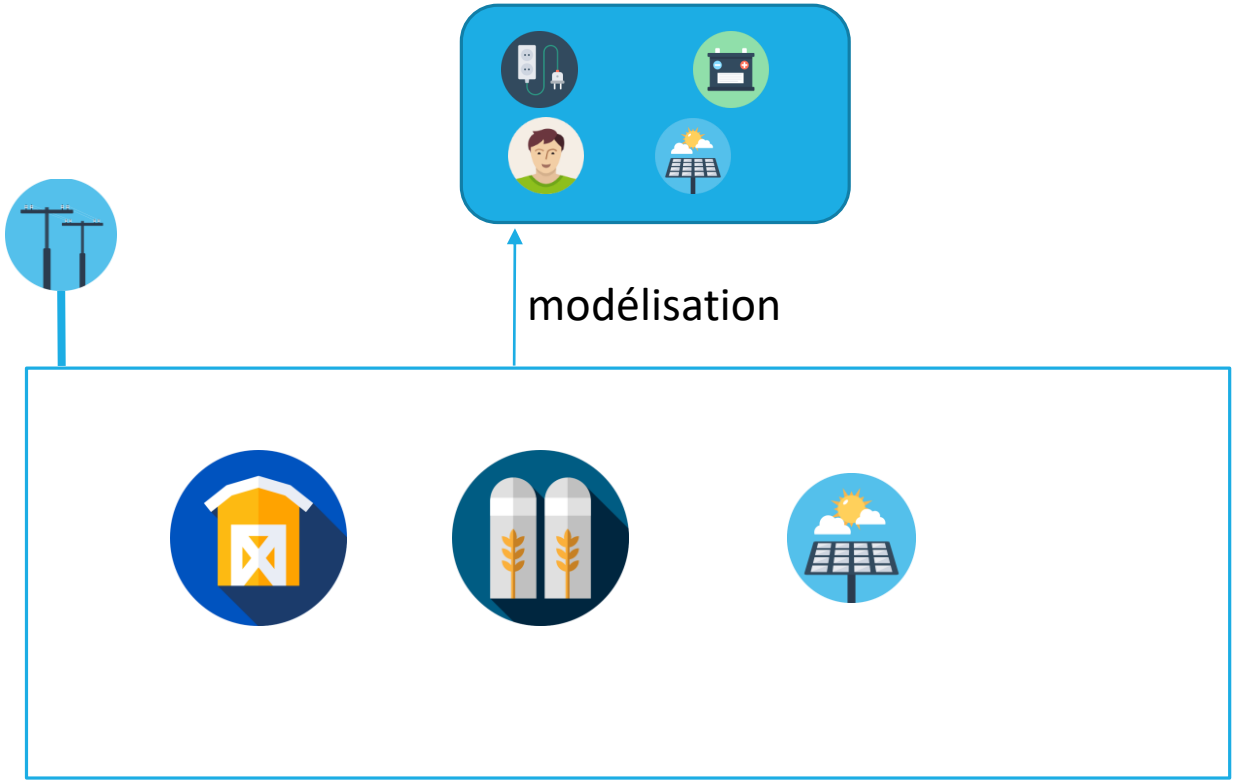
1. modélisation
2. simulation et prédiction
3. optimisation
4. conseil et pilotage

État de l'art



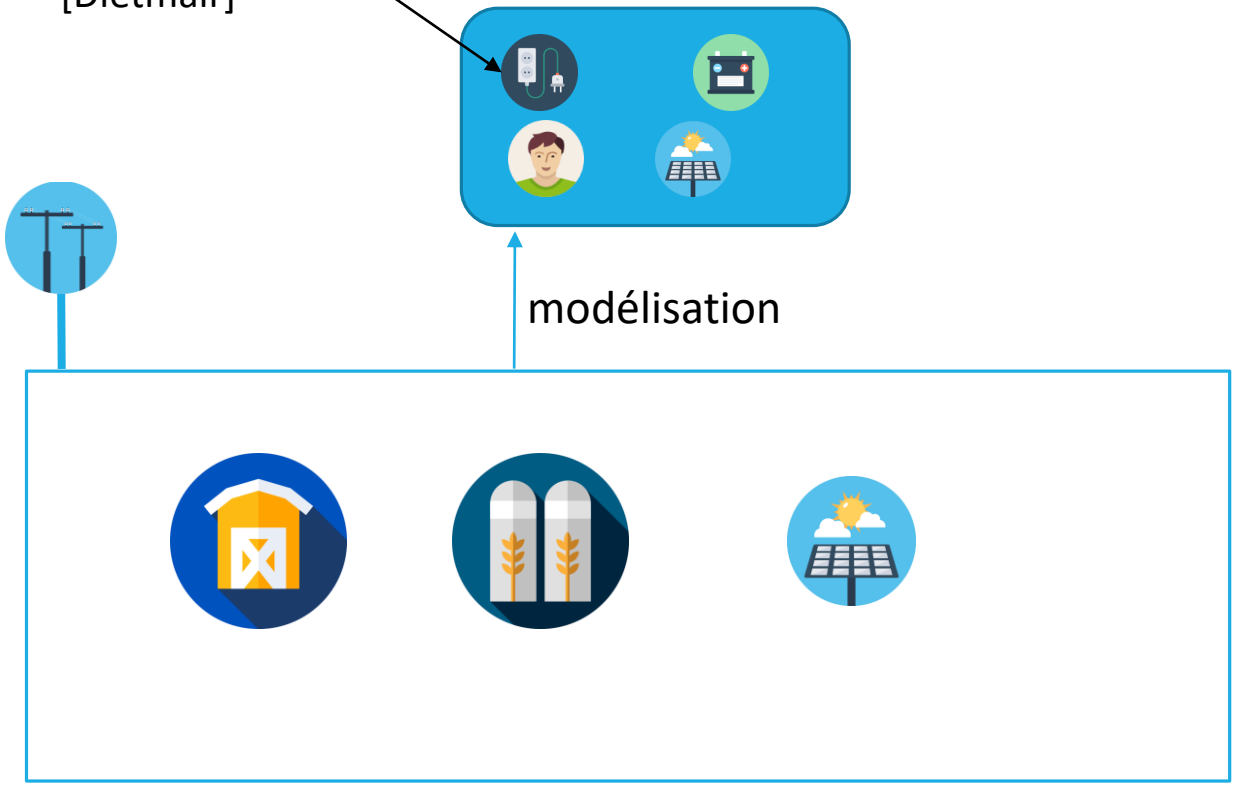
1. modélisation
2. simulation et prédiction
3. optimisation
4. conseil et pilotage

État de l'art : 1 modélisation



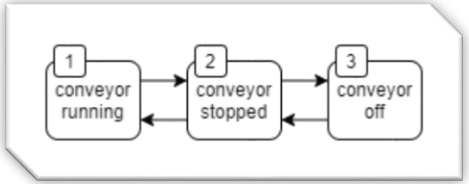
État de l'art : 1 modélisation

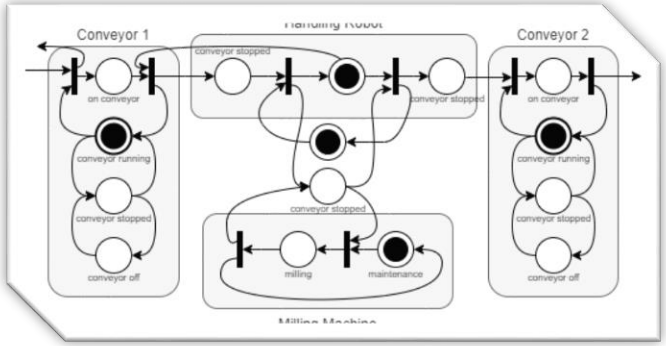
Machine à états
Réseau pétri
[Dietmair]



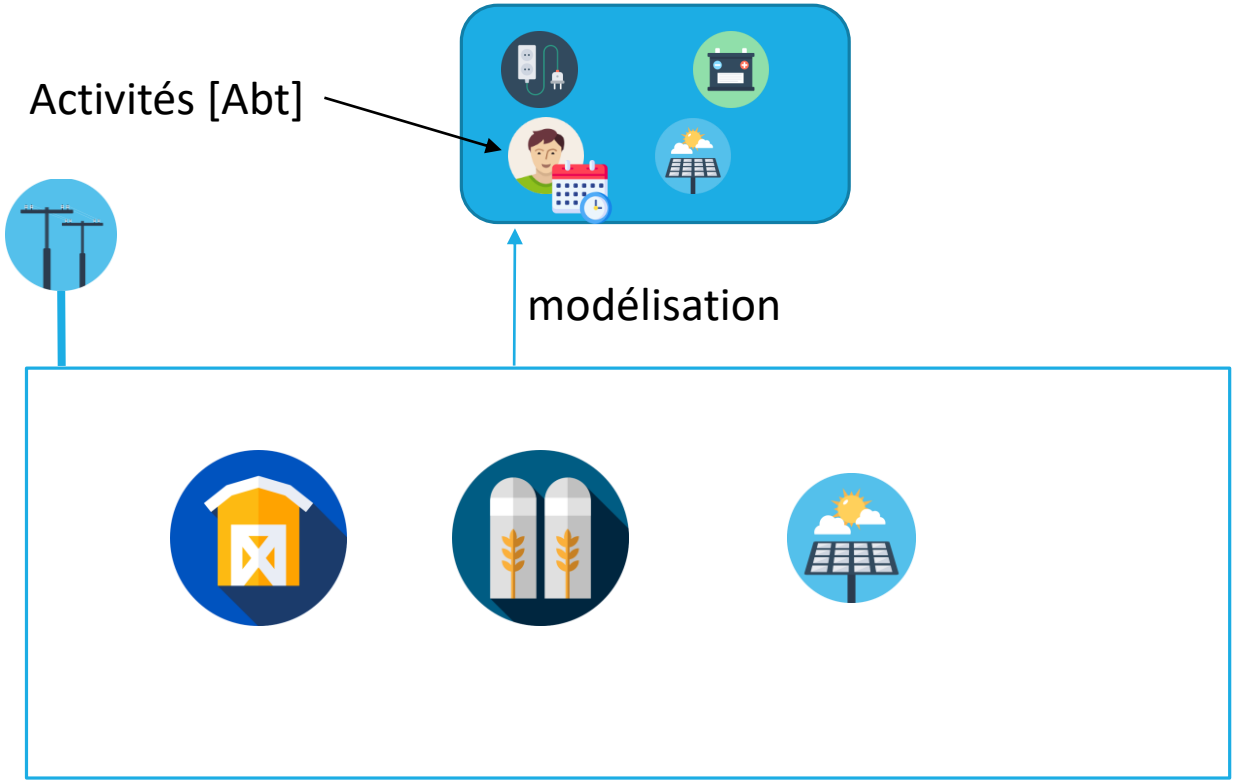
Décomposition des machines

Données de consommation

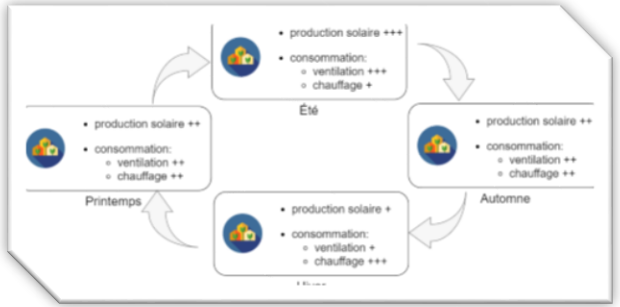




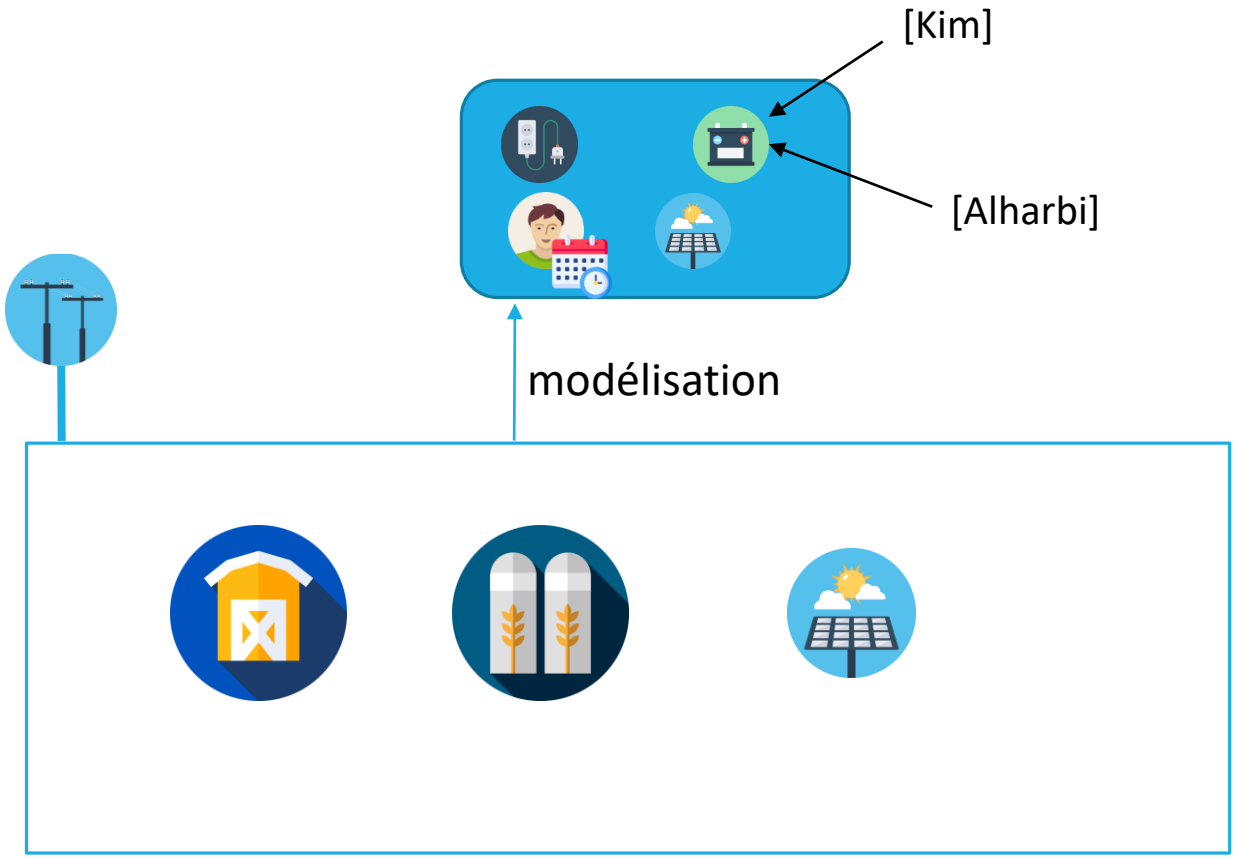
État de l'art : 1 modélisation



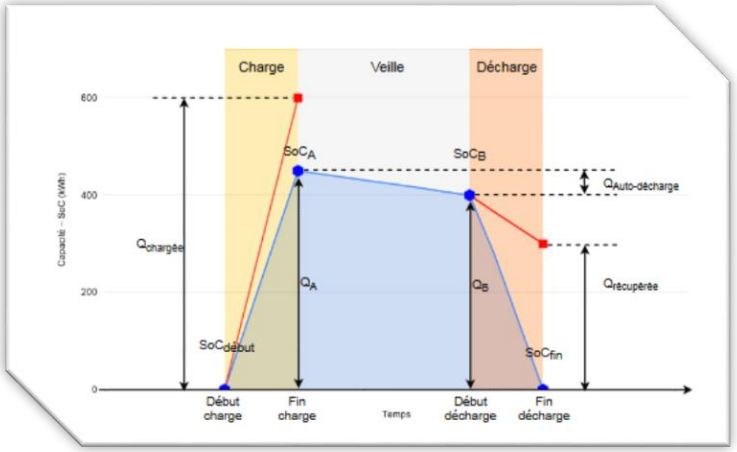
Impact des saisons



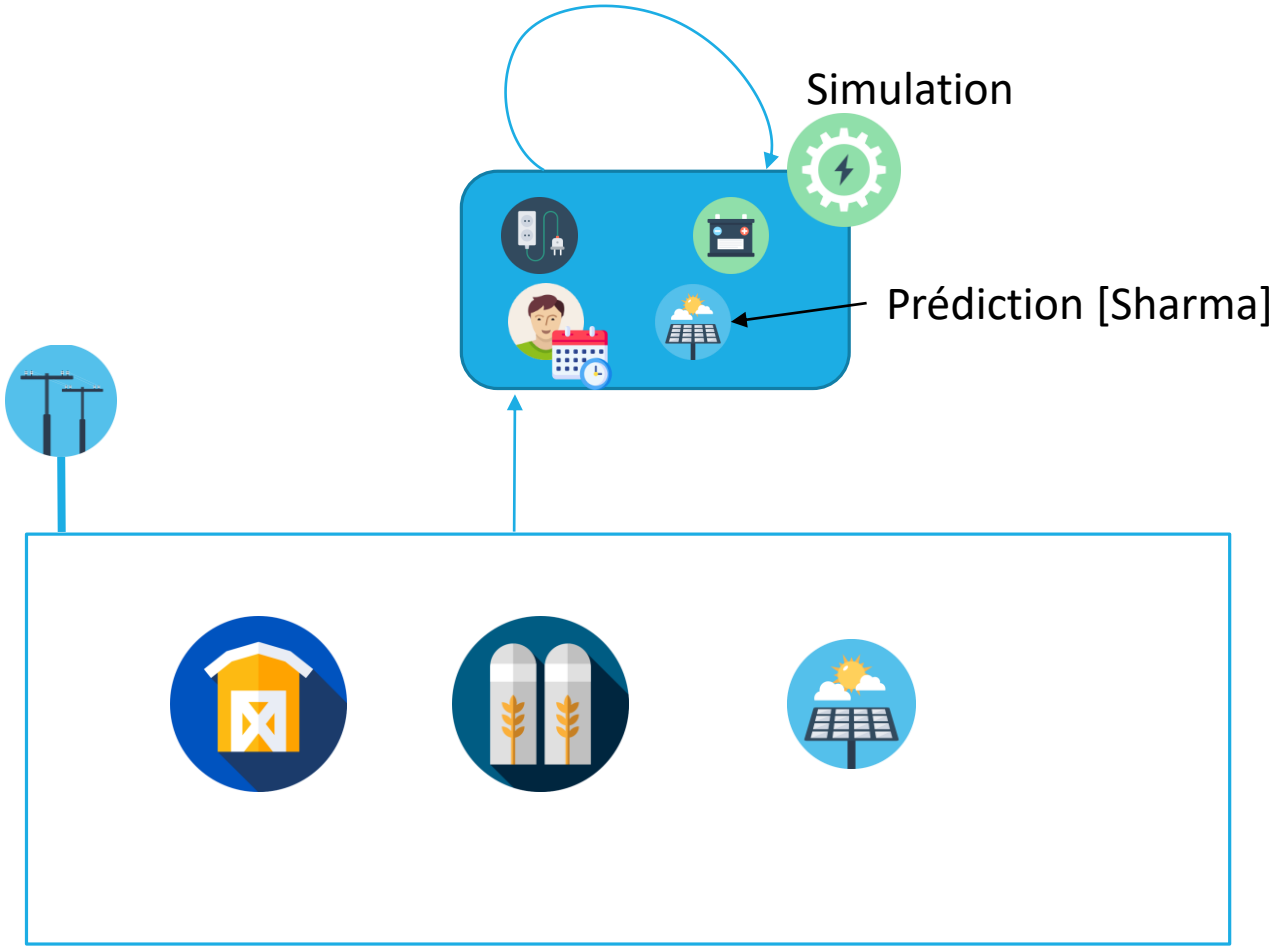
État de l'art : 1 modélisation



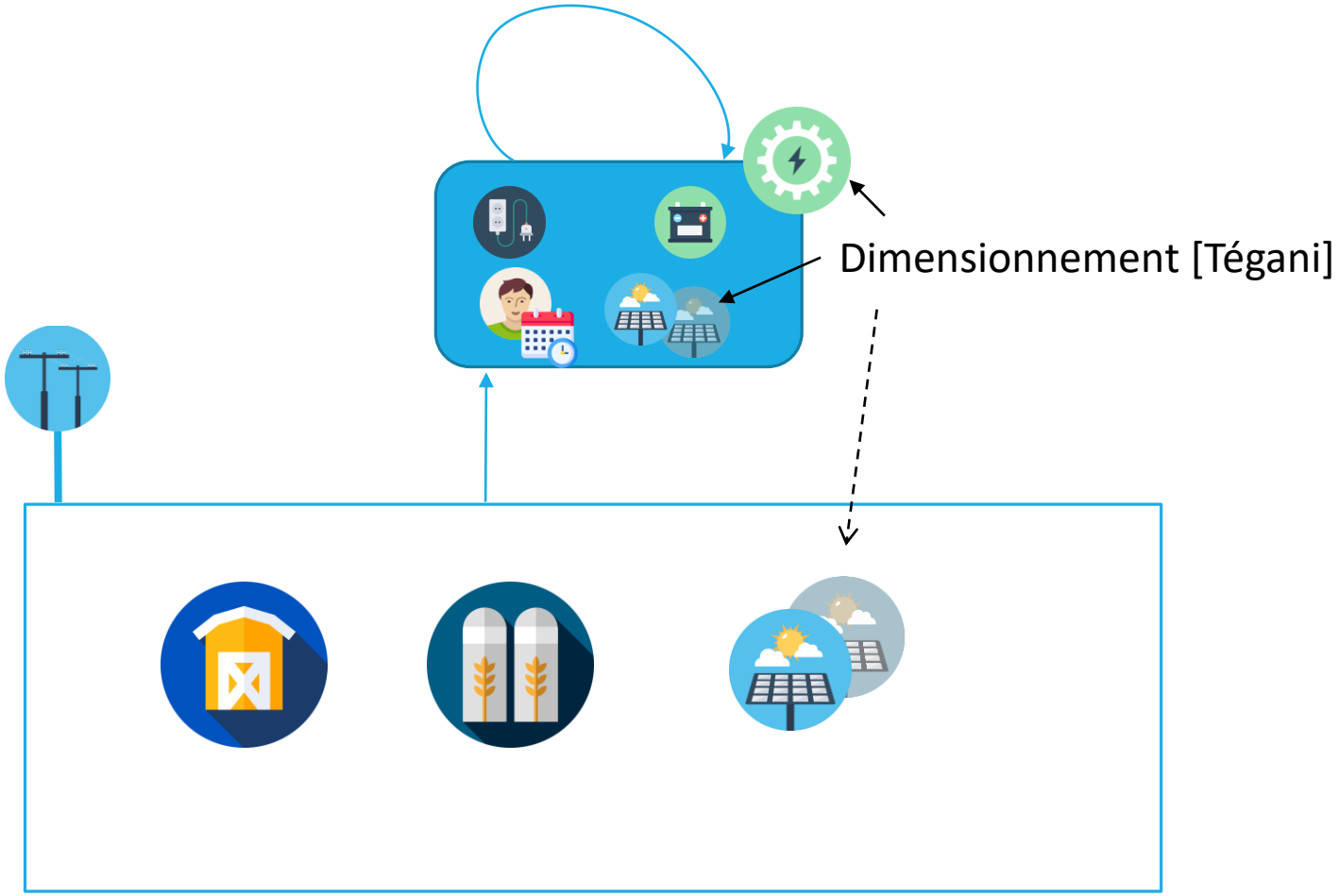
$$V_{batt} = E_0 - K\left(\frac{Q}{Q-it}\right)i + A\exp(-B\cdot Q^{-1}\cdot it) - Ri$$

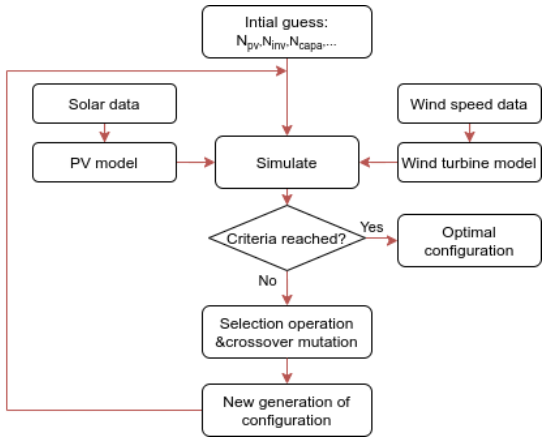


État de l'art : ❷ simulation et prédiction



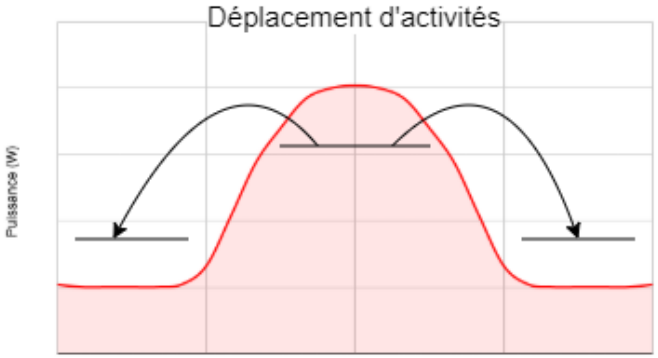
État de l'art : 3 optimisation

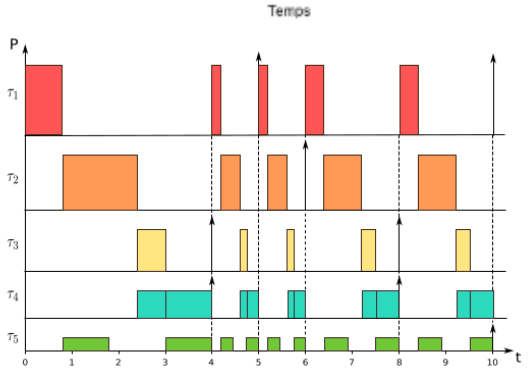




État de l'art : 3 optimisation

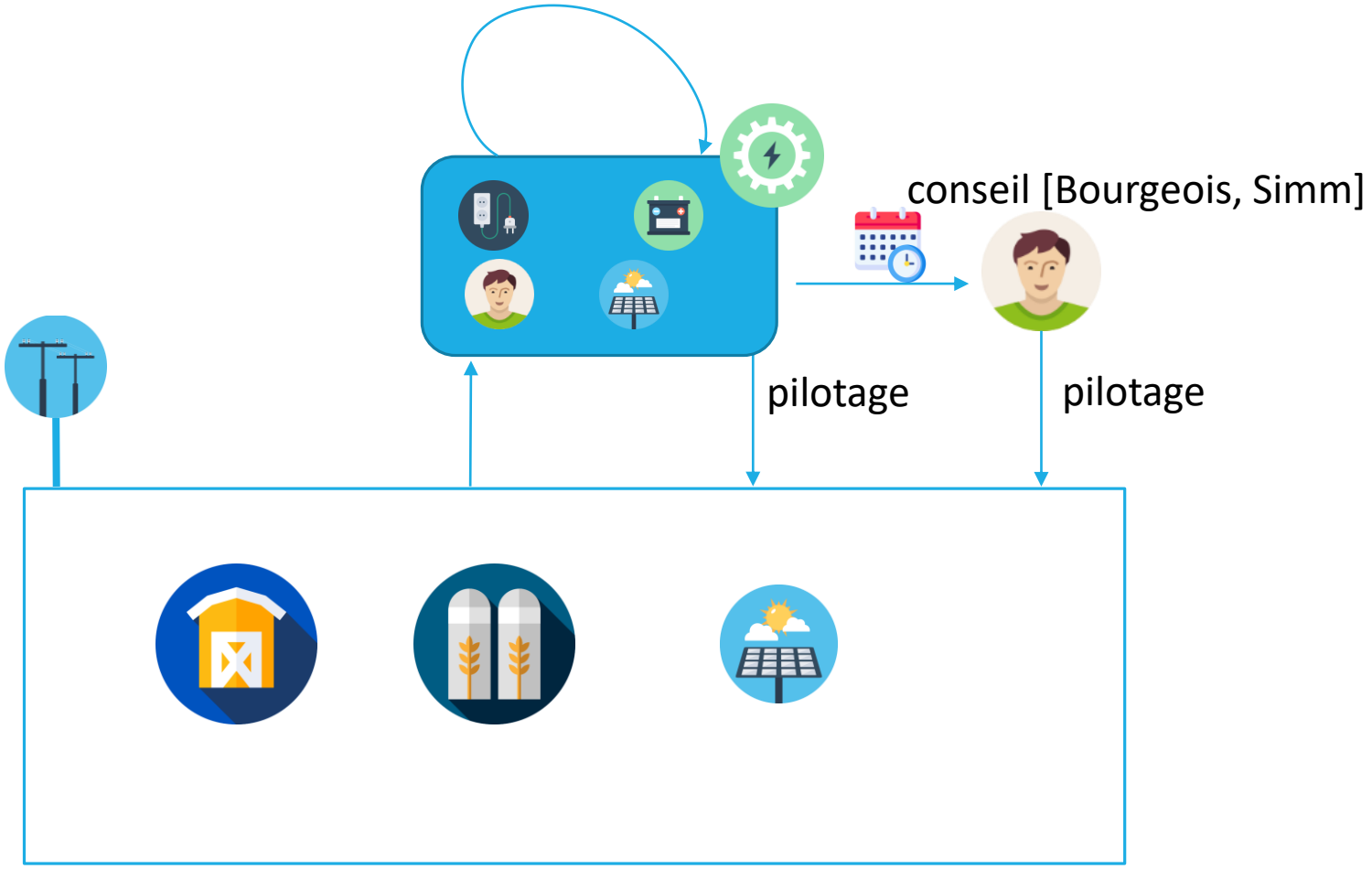
Optimisation [Matthias, Caprino, Werminski]





[DeMartini]

État de l'art : 4 conseil et pilotage



Limites de l’état de l’art

Très nombreux modèles

Très nombreux algorithmes

Très/trop spécialisés

Sur des usages

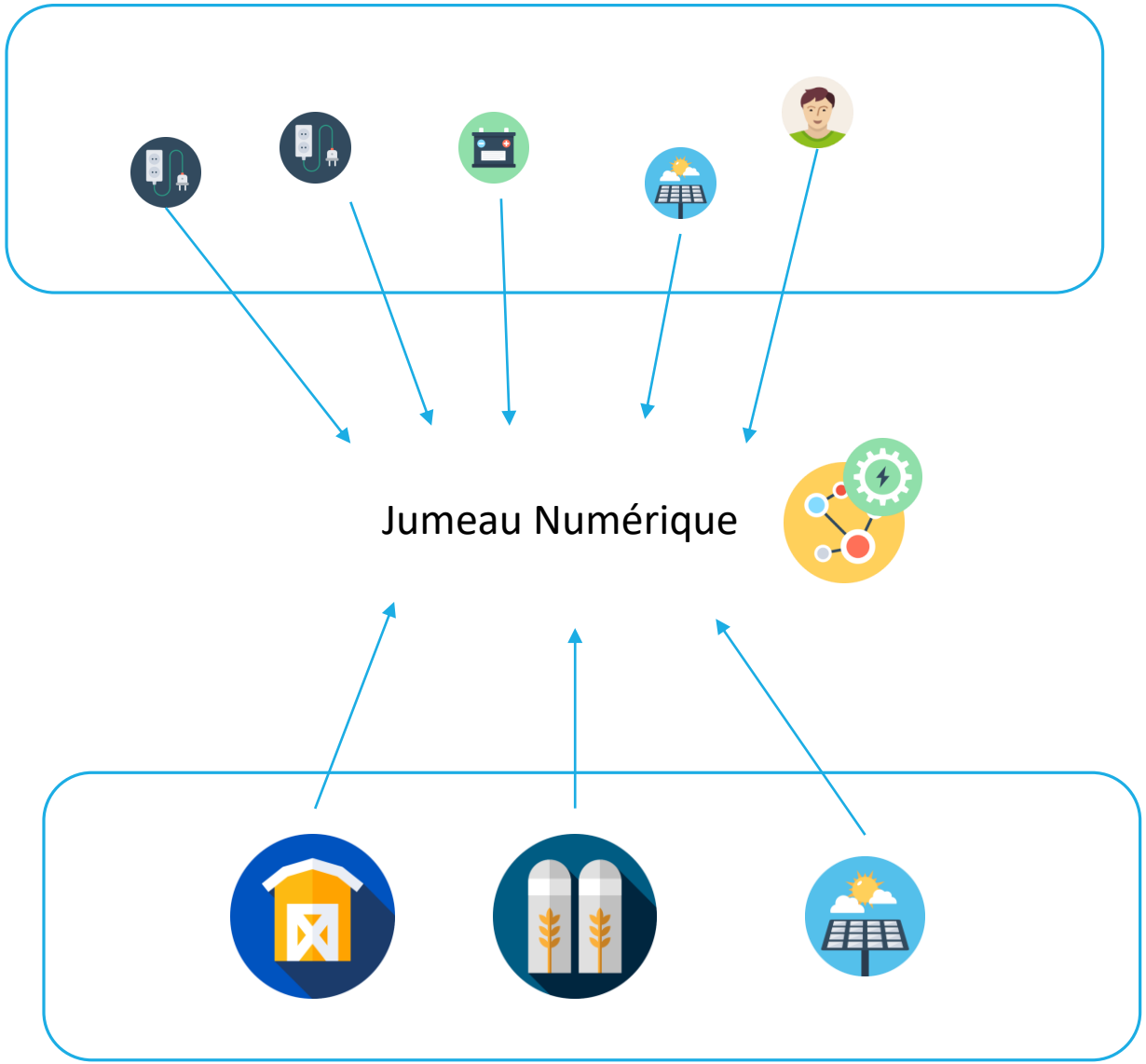
Sur des sous problèmes spécifiques

Peu de solutions couvrant l'ensemble du cycle de vie

Manque d’unification et de vision globale

Manque d’expérimentation globale sur le terrain

Proposition



Jumeau Numérique: définitions

Virtual representation of a real product in the context of Cyber-Physical Systems.— [Schroeder]

*An integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of an as-built system, enabled by Digital Thread, that uses the best available **models**, **sensor** information, and input data to mirror and **predict** activities/performance over the life of its corresponding physical twin – [Kraft]*

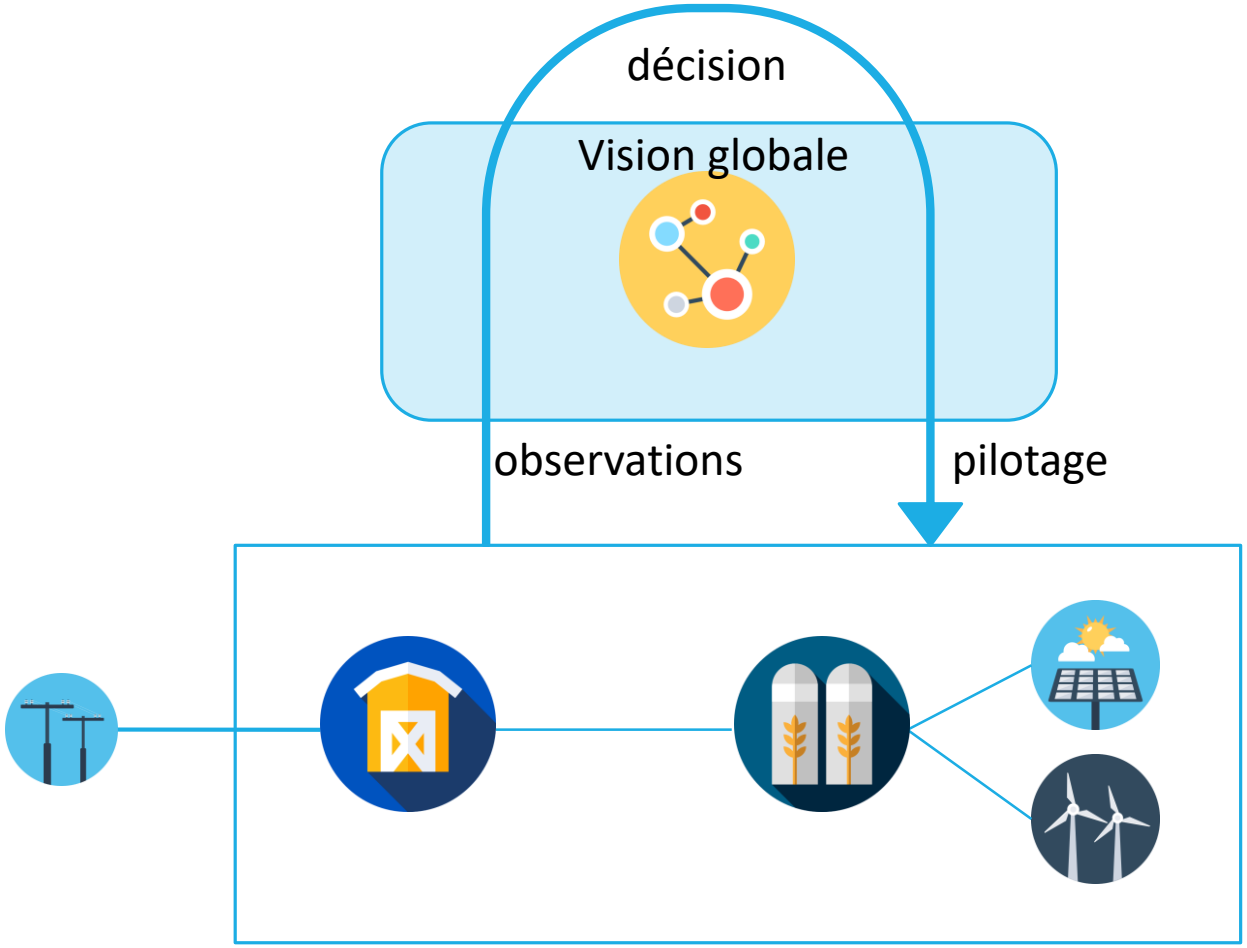
Jumeau Numérique: définitions

Virtual representation of a real product in the context of Cyber-Physical Systems.— [Schroeder]

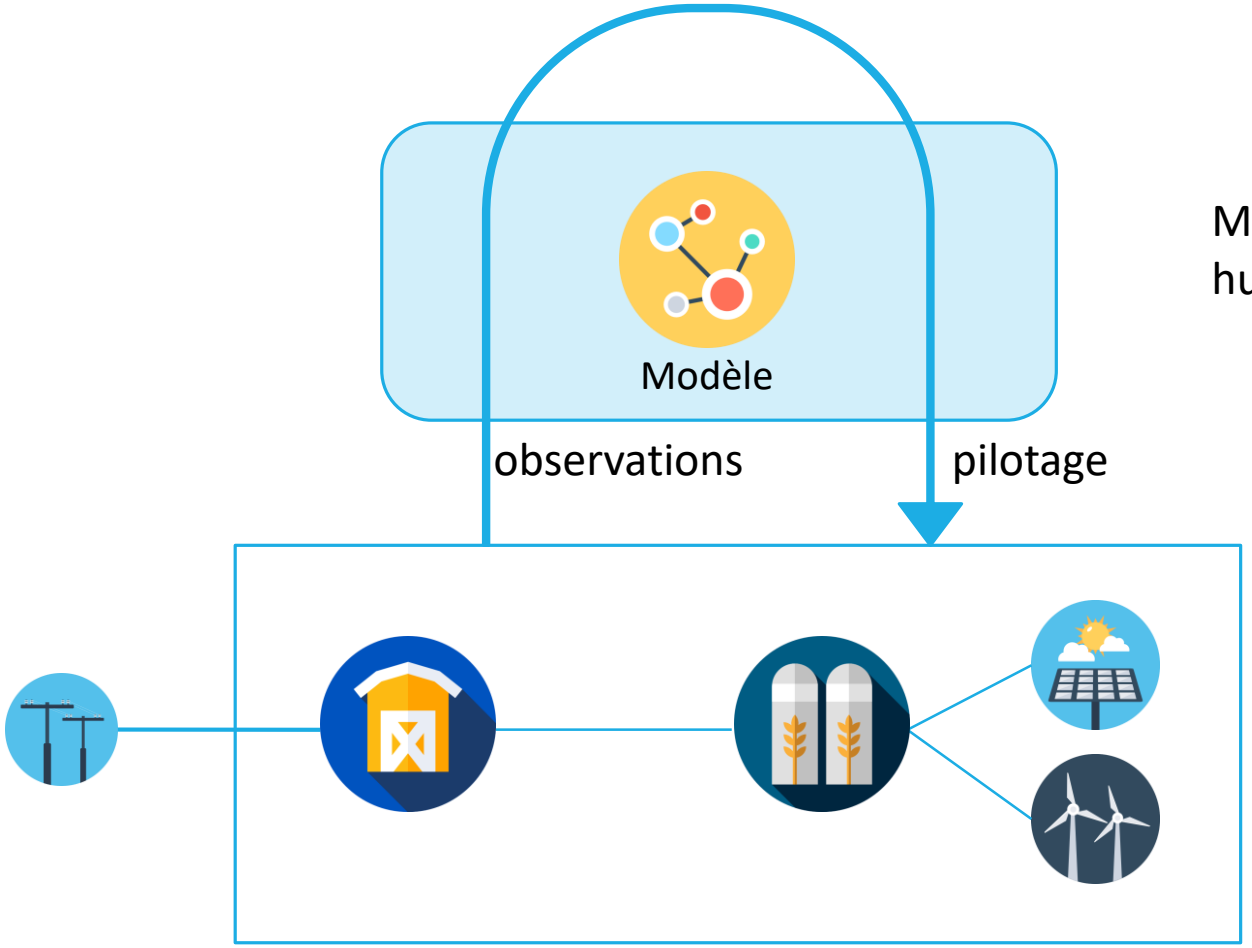
*An integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of an as-built system, enabled by Digital Thread, that uses the best available **models**, **sensor** information, and input data to mirror and **predict** activities/performance over the life of its corresponding physical twin – [Kraft]*

Vue globale, simplifiée d'une **microgrille**, de ses échanges d'énergie et des activités régissant ces échanges en vue de les **optimiser**

Jumeau Numérique



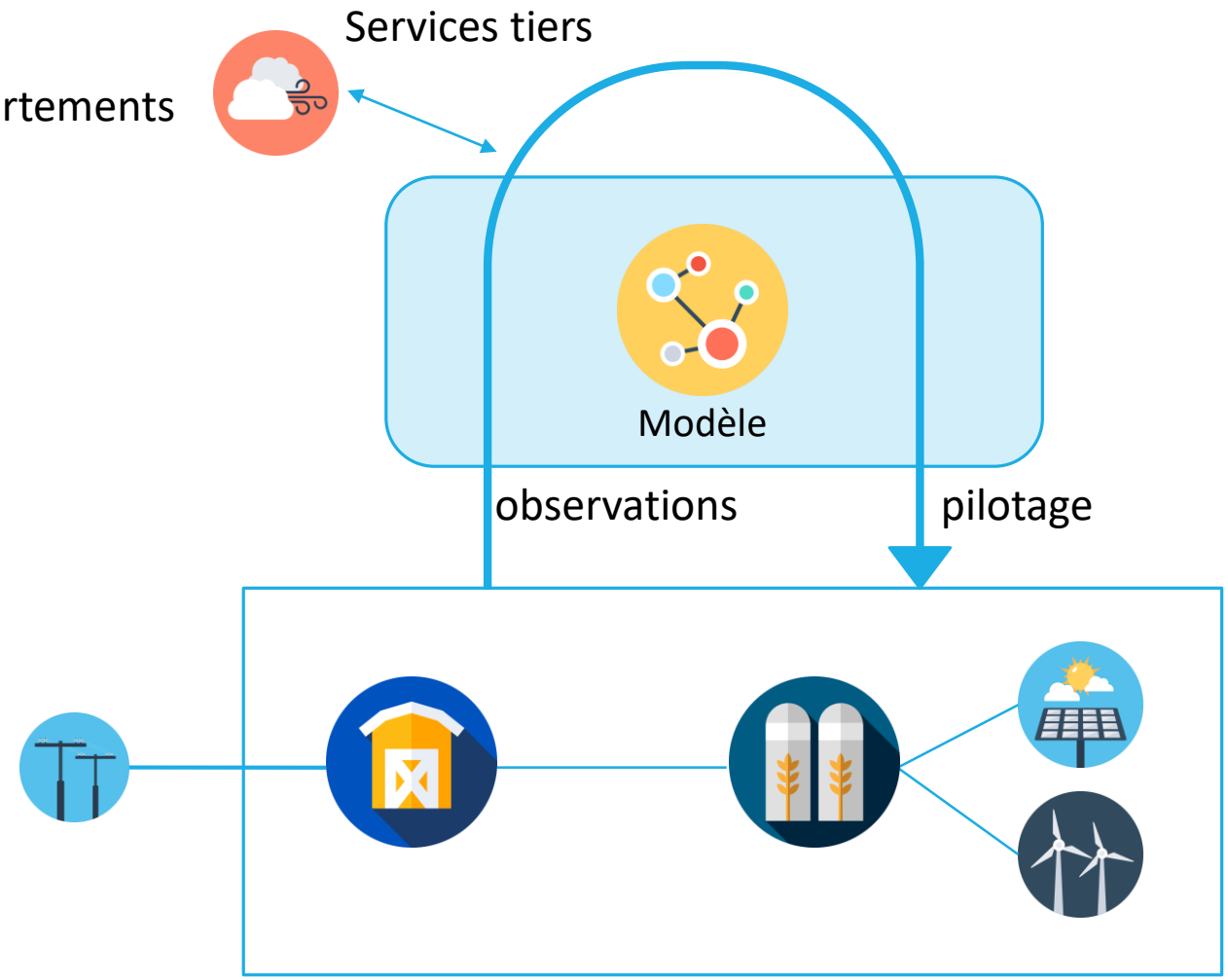
Jumeau Numérique 1



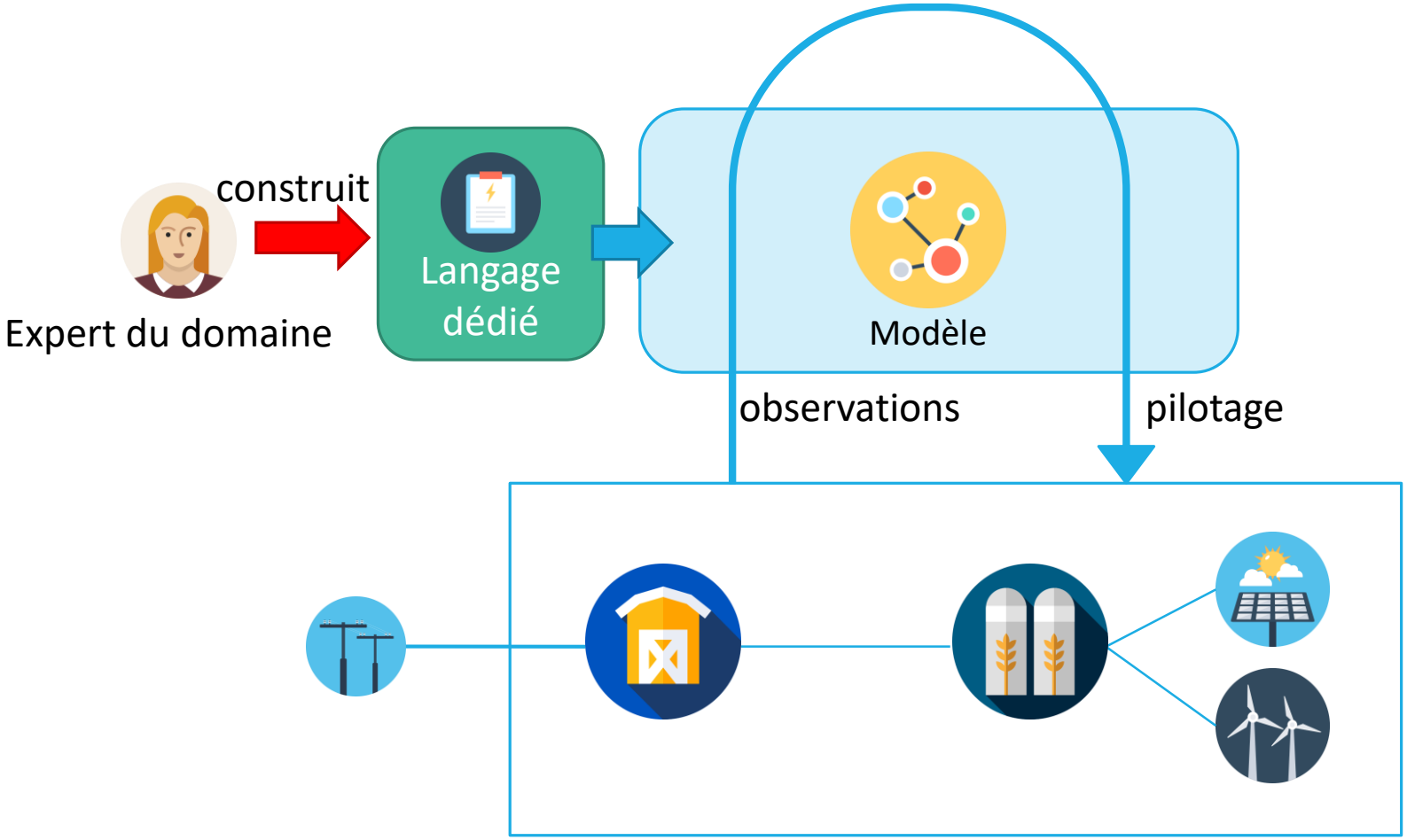
Modèle = physique + humain/vivant + environnement

Jumeau Numérique ❶+❷

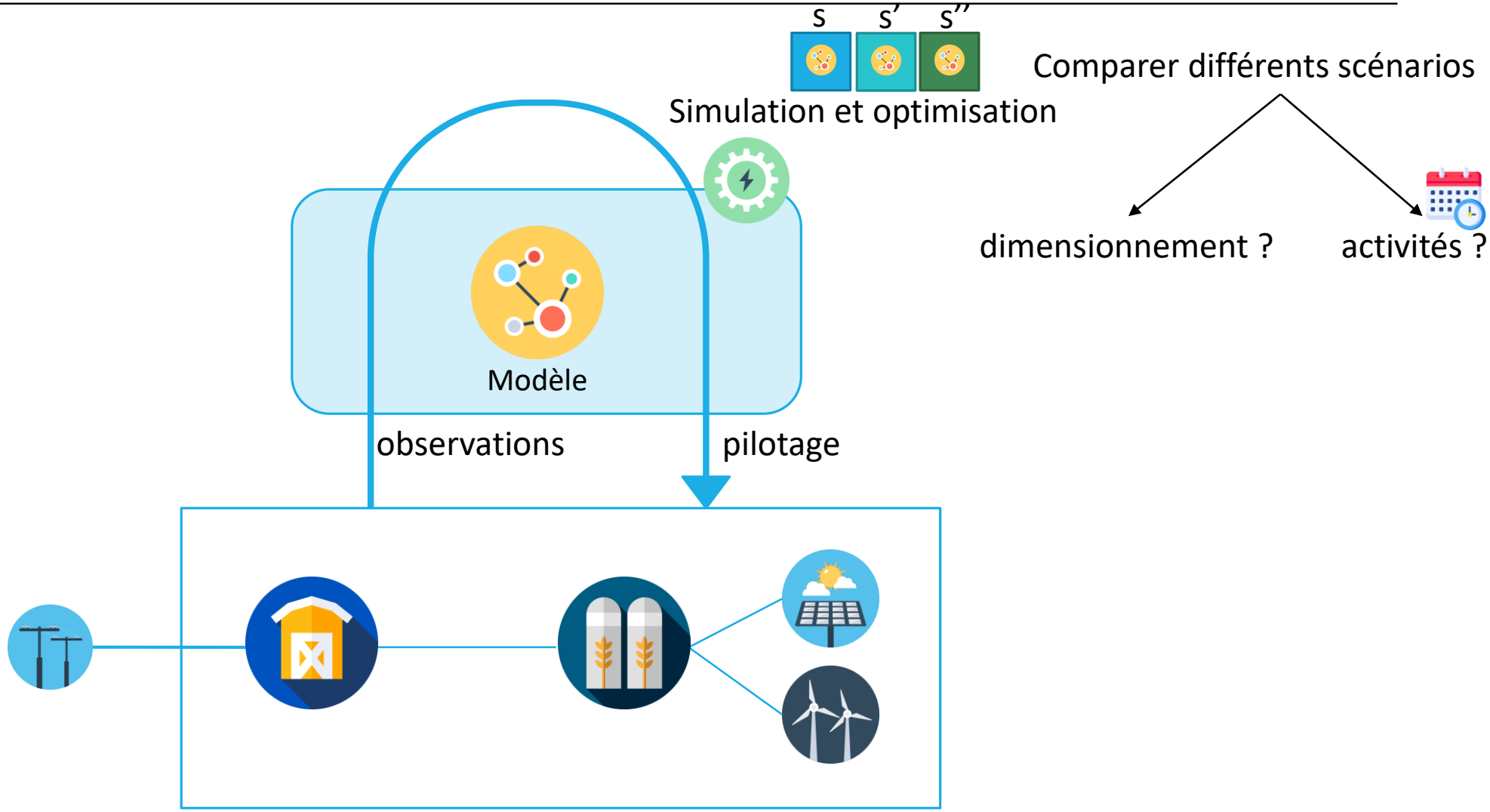
Prédiction météo
Prédiction comportements



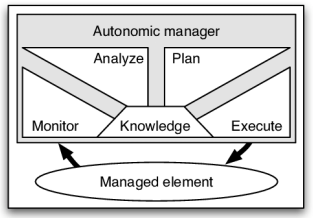
Jumeau Numérique



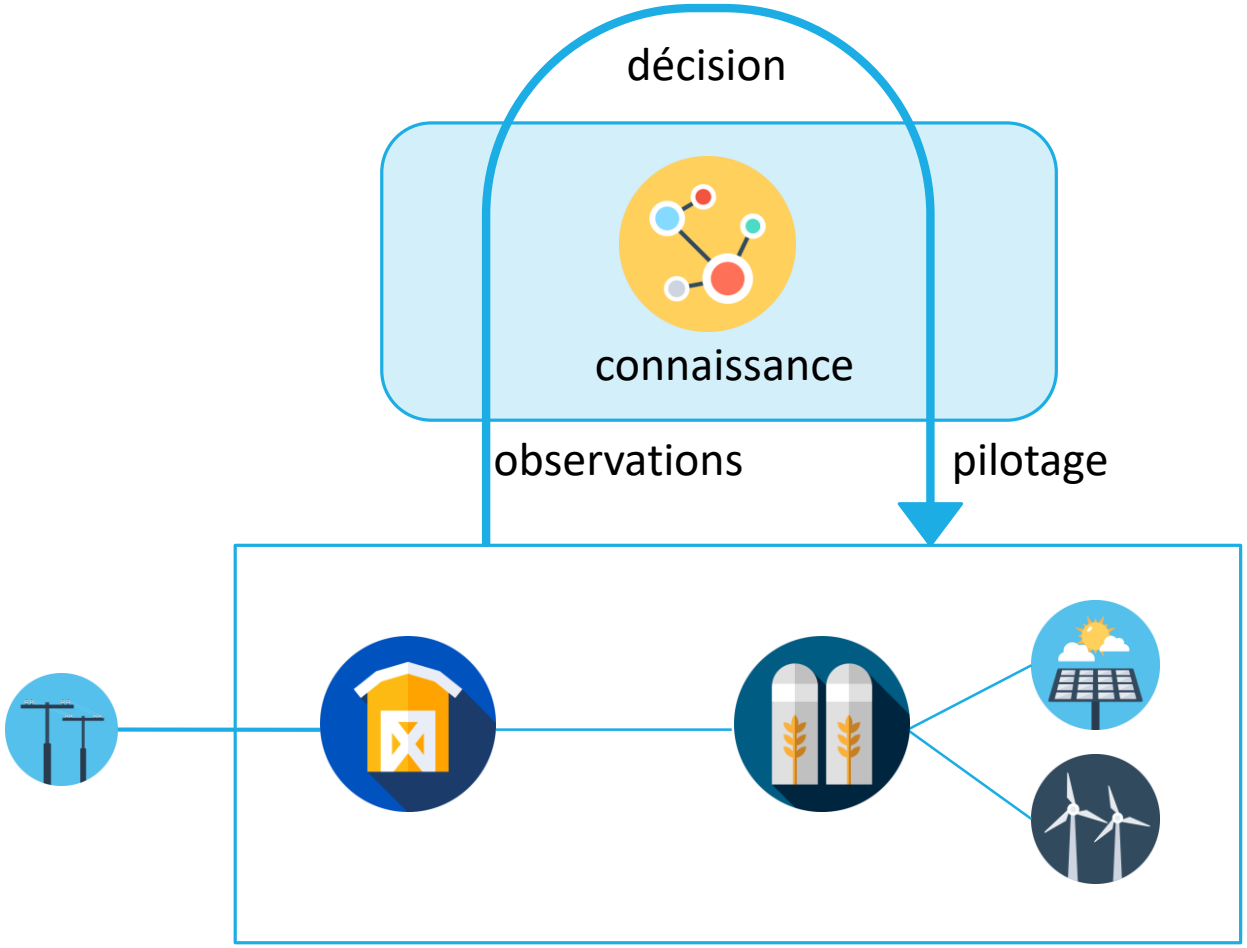
Jumeau Numérique 3



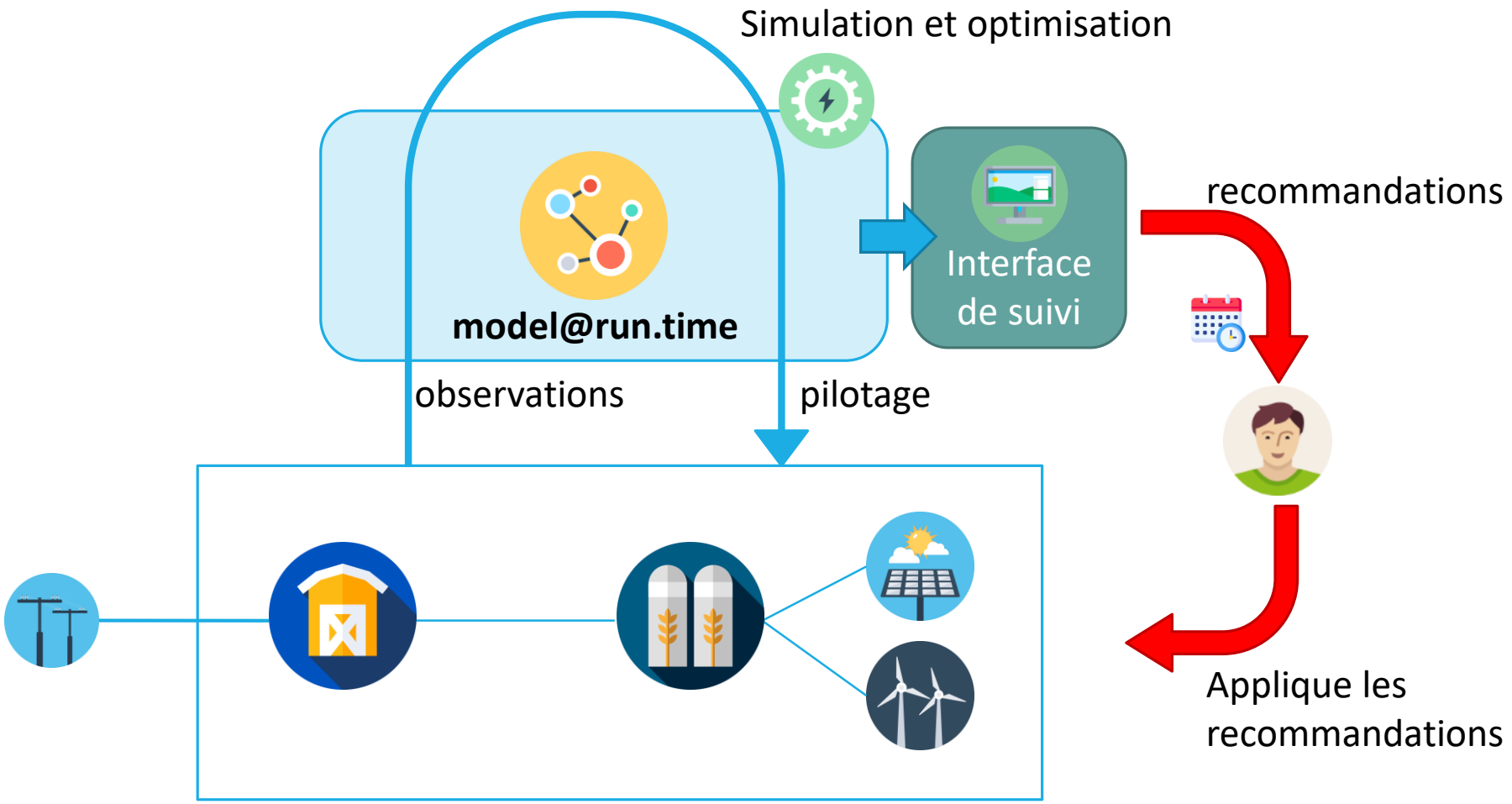
Jumeau Numérique



[Kephart]



Jumeau Numérique ❹



Modélisation

- Analyse du domaine
- Métamodèle
- Langage dédié (DSL)

Analyse : interviews

2 experts OKWind :

- Technicien
- Ingénieure agricole

3 utilisateurs finaux :

- 2 éleveurs du secteur laitier
- 1 responsable secteur industriel

Améliorer leur efficacité énergétique

Analyse : interviews

2 experts OKWind :

- Technicien
- Ingénieure agricole

3 utilisateurs finaux :

- 2 éleveurs du secteur laitier
- 1 responsable secteur industriel

Améliorer leur efficacité énergétique

- Journée type
- Pourquoi cette organisation
- Changements dans l'année

Analyse : interviews

2 experts OKWind :

- Technicien
- Ingénieure agricole

3 utilisateurs finaux :

- 2 éleveurs du secteur laitier
- 1 responsable secteur industriel

- Journée type
- Pourquoi cette organisation
- Changements dans l'année

Décrire la **variabilité** et la **flexibilité**

Analyse : interviews

2 experts OKWind :

- Technicien
- Ingénieure agricole

3 utilisateurs finaux :

- 2 éleveurs du secteur laitier
- 1 responsable secteur industriel

- Journée type
- Pourquoi cette organisation
- Changements dans l'année

Décrire la **variabilité** et la **flexibilité**

Correction de notre modélisation

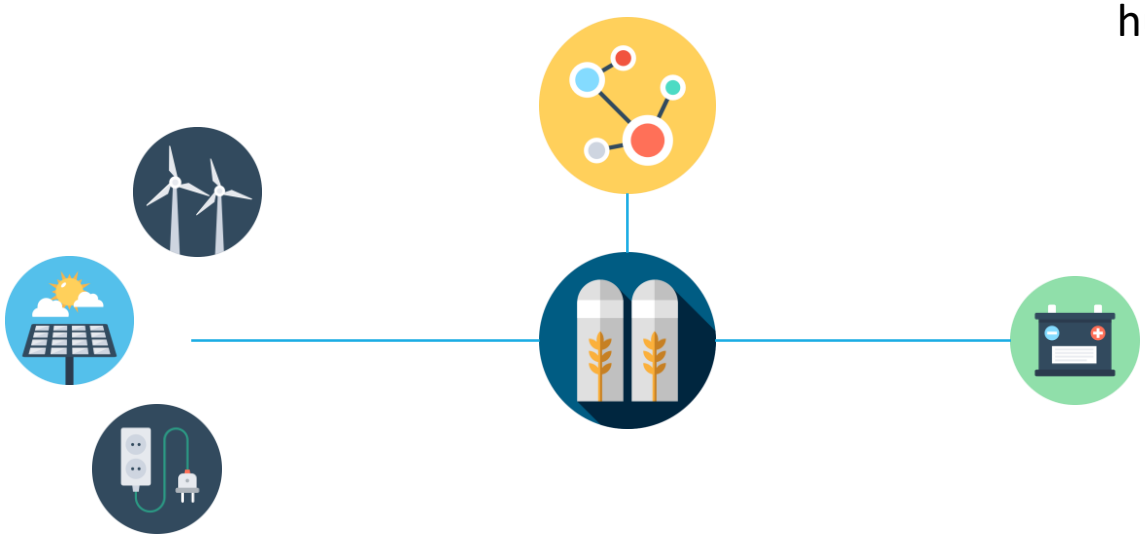
Interviews : retours

Corrections de notre modélisation :

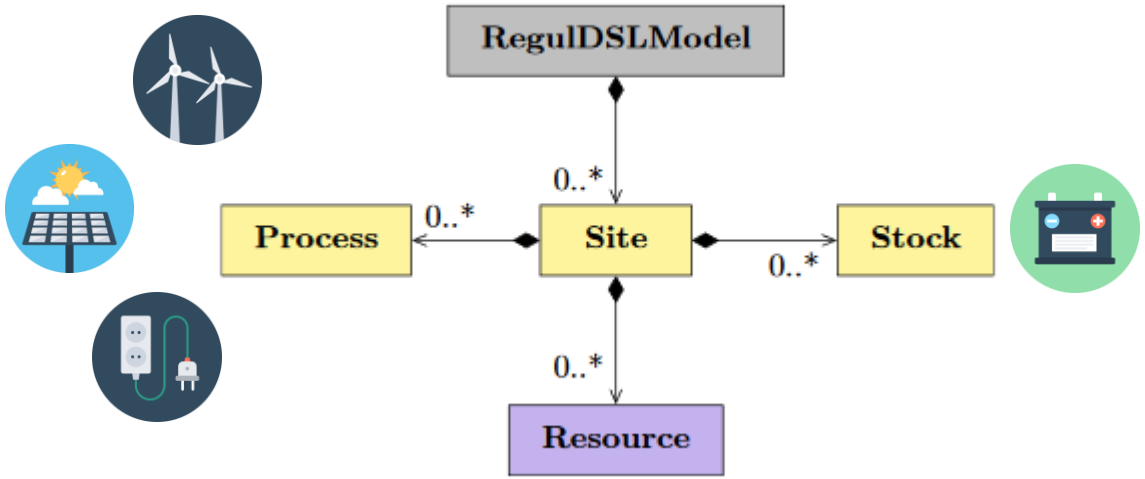
- Types de dépendance entre activités
- Opérations communes sur les données brutes

RegulDSL: metamodèle

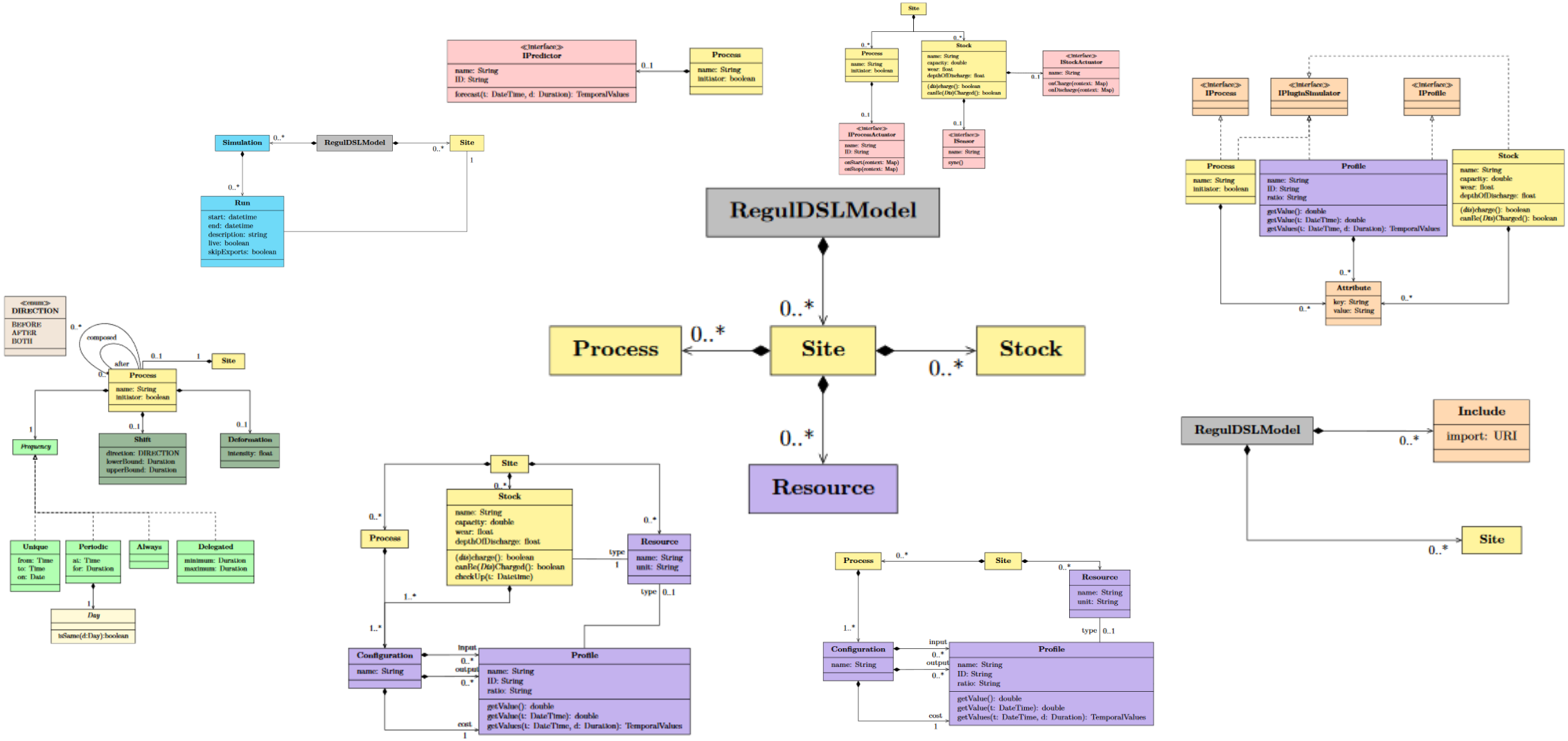
Modèle = physique + humain/vivant + environnement



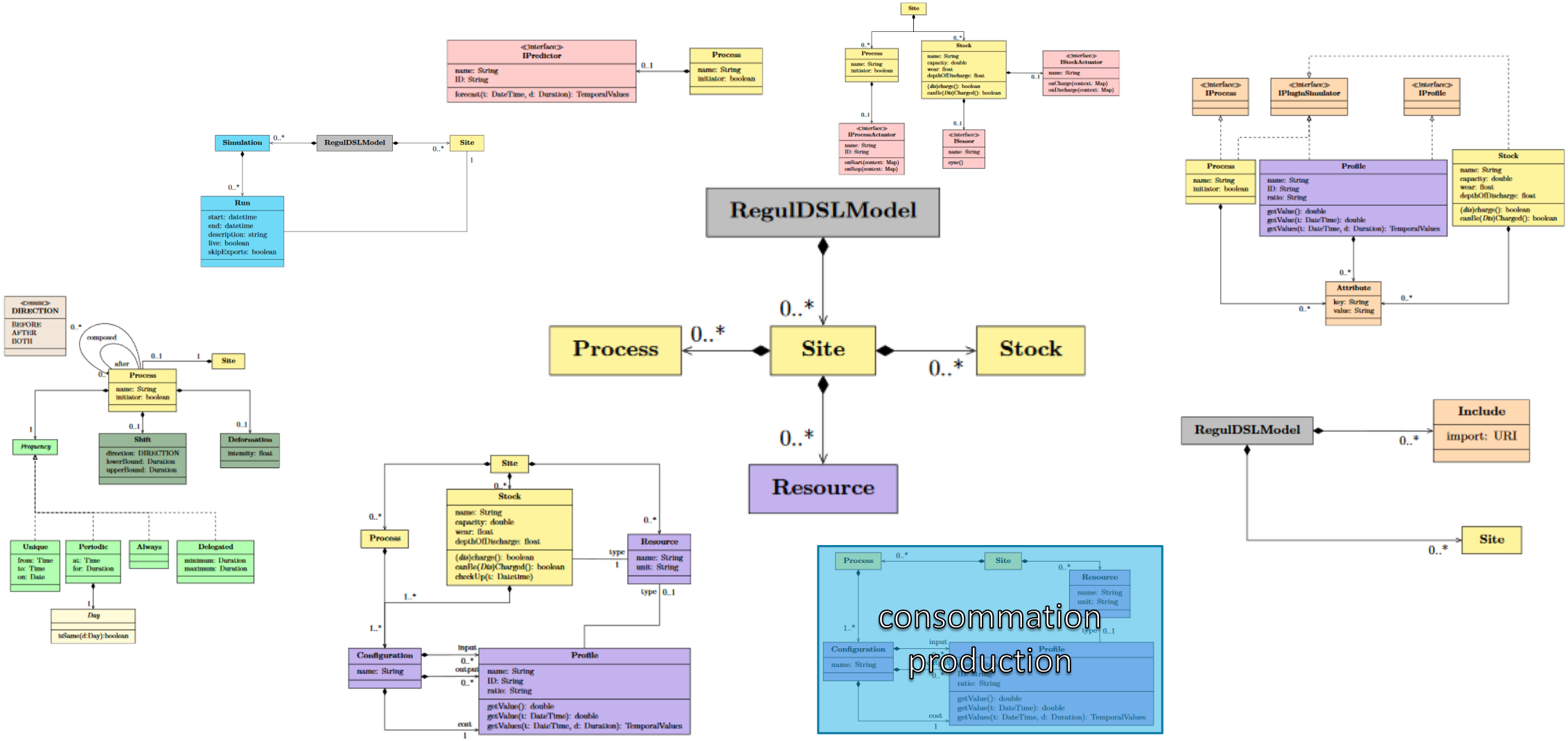
RegulDSL: metamodèle



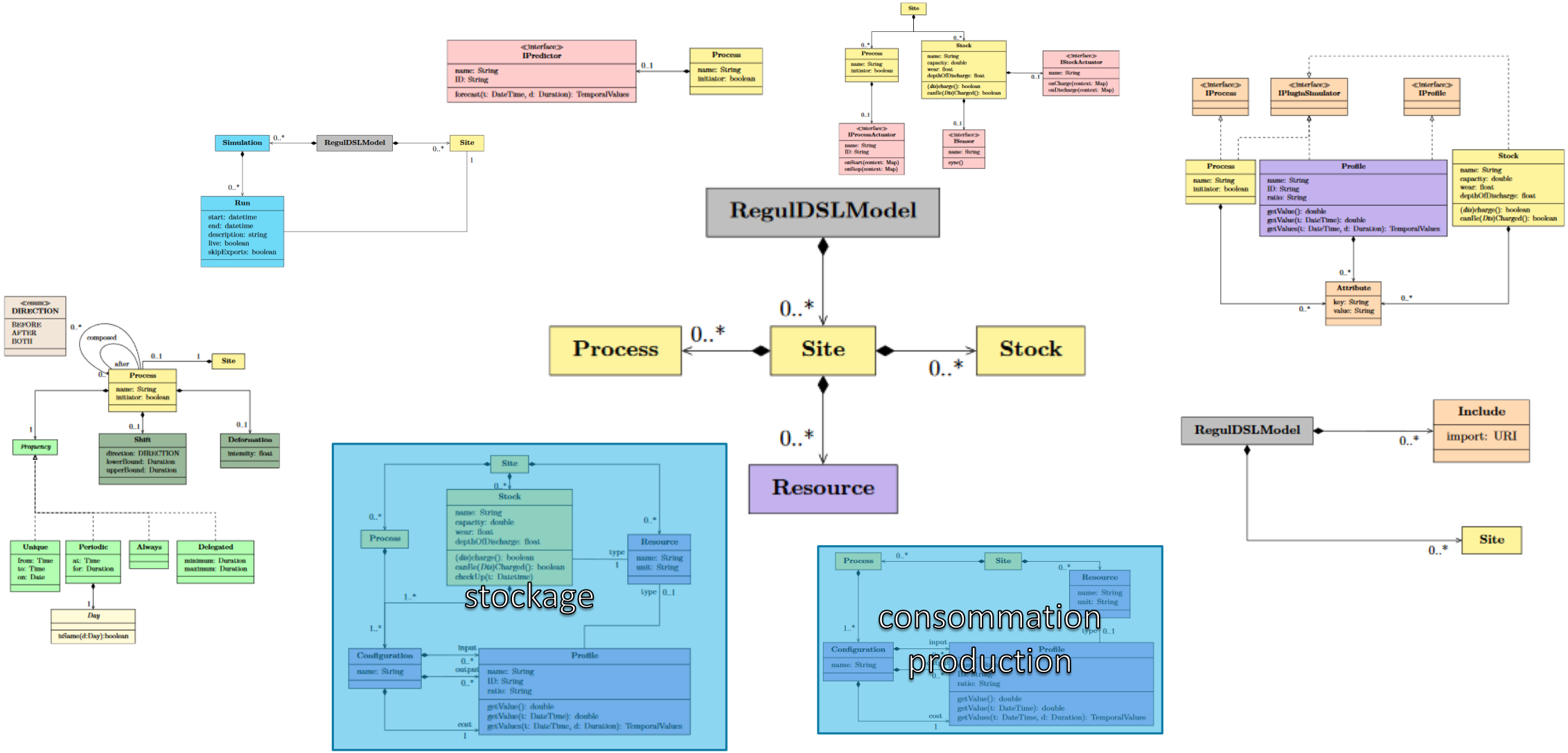
RegulDSL: metamodèle



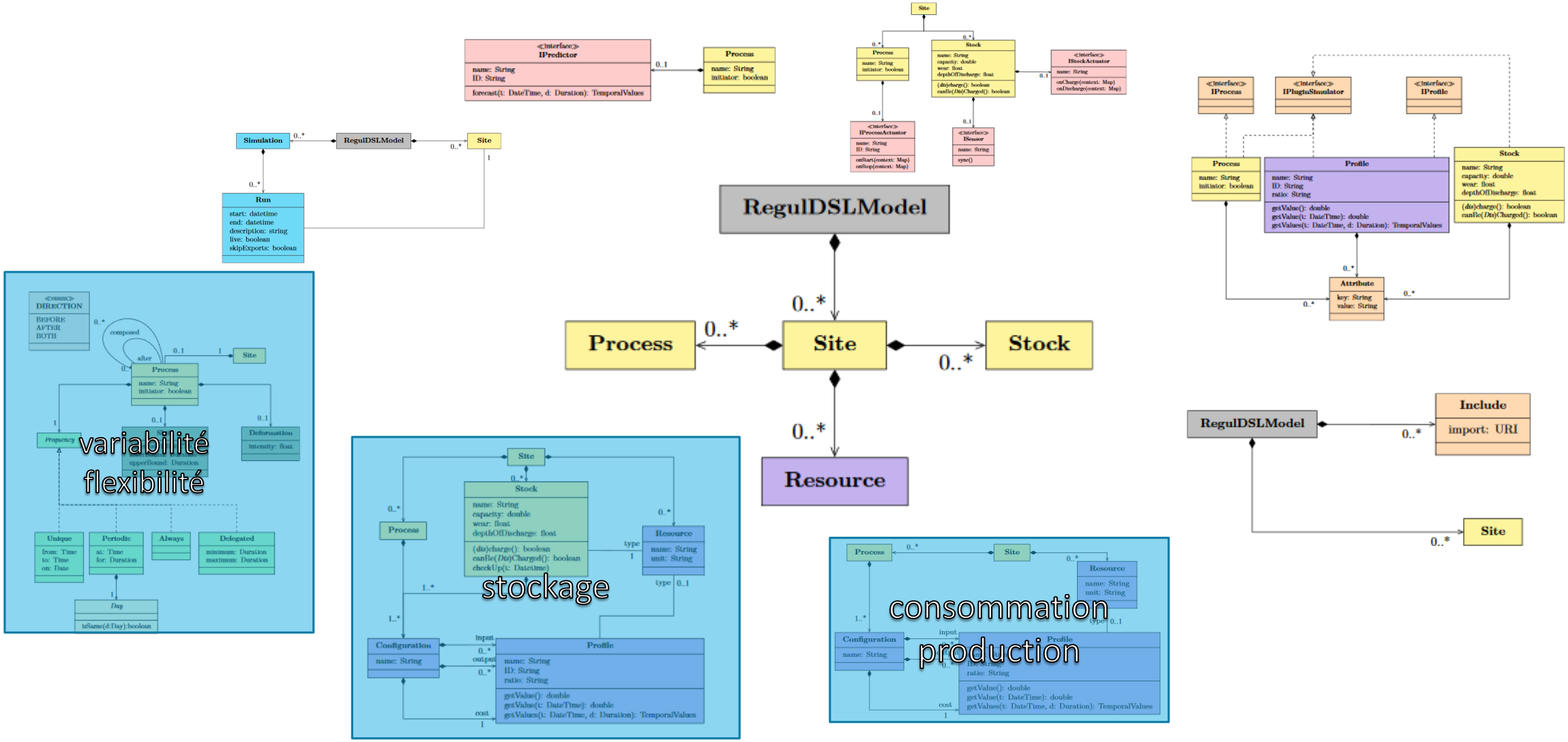
RegulDSL: metamodèle



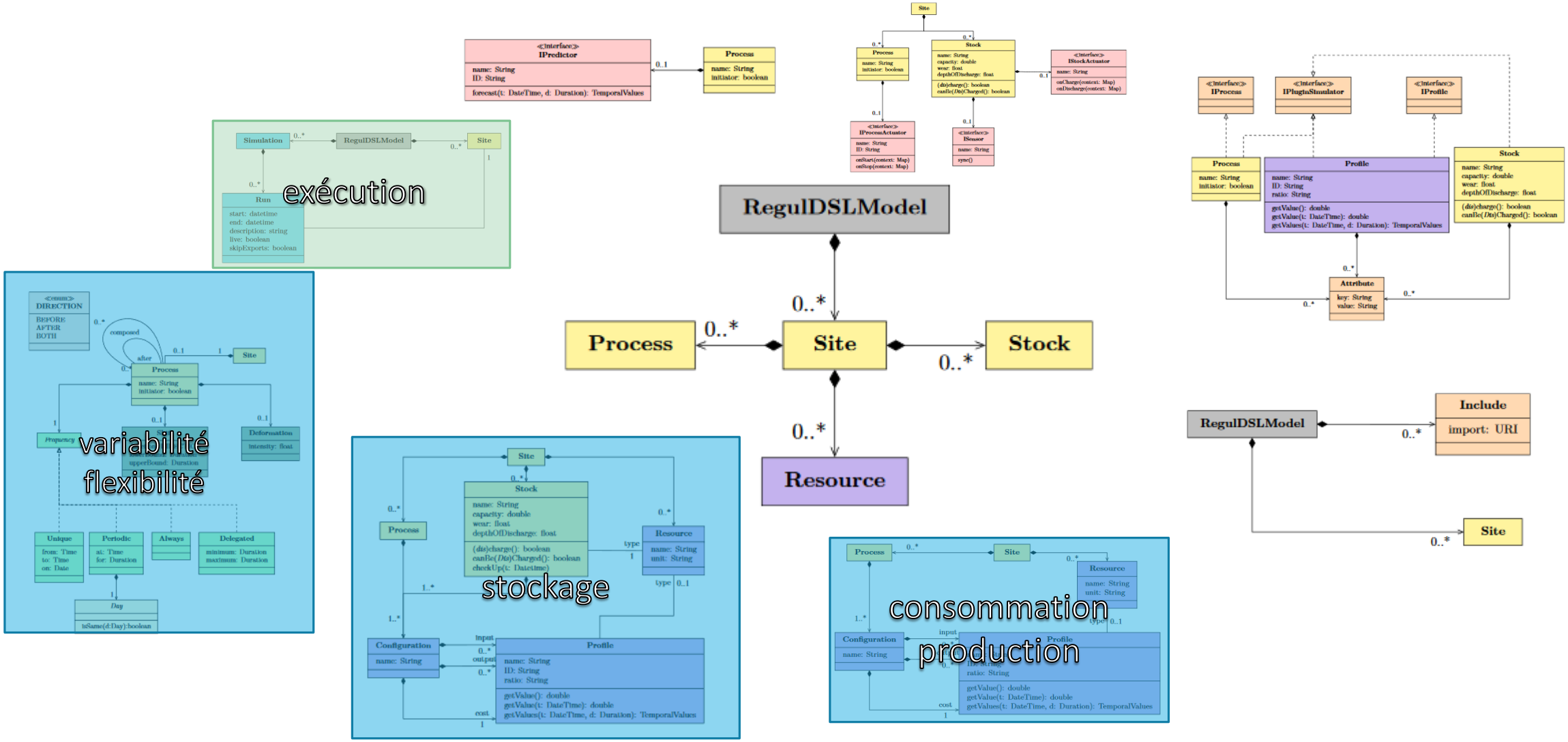
RegulDSL: metamodèle



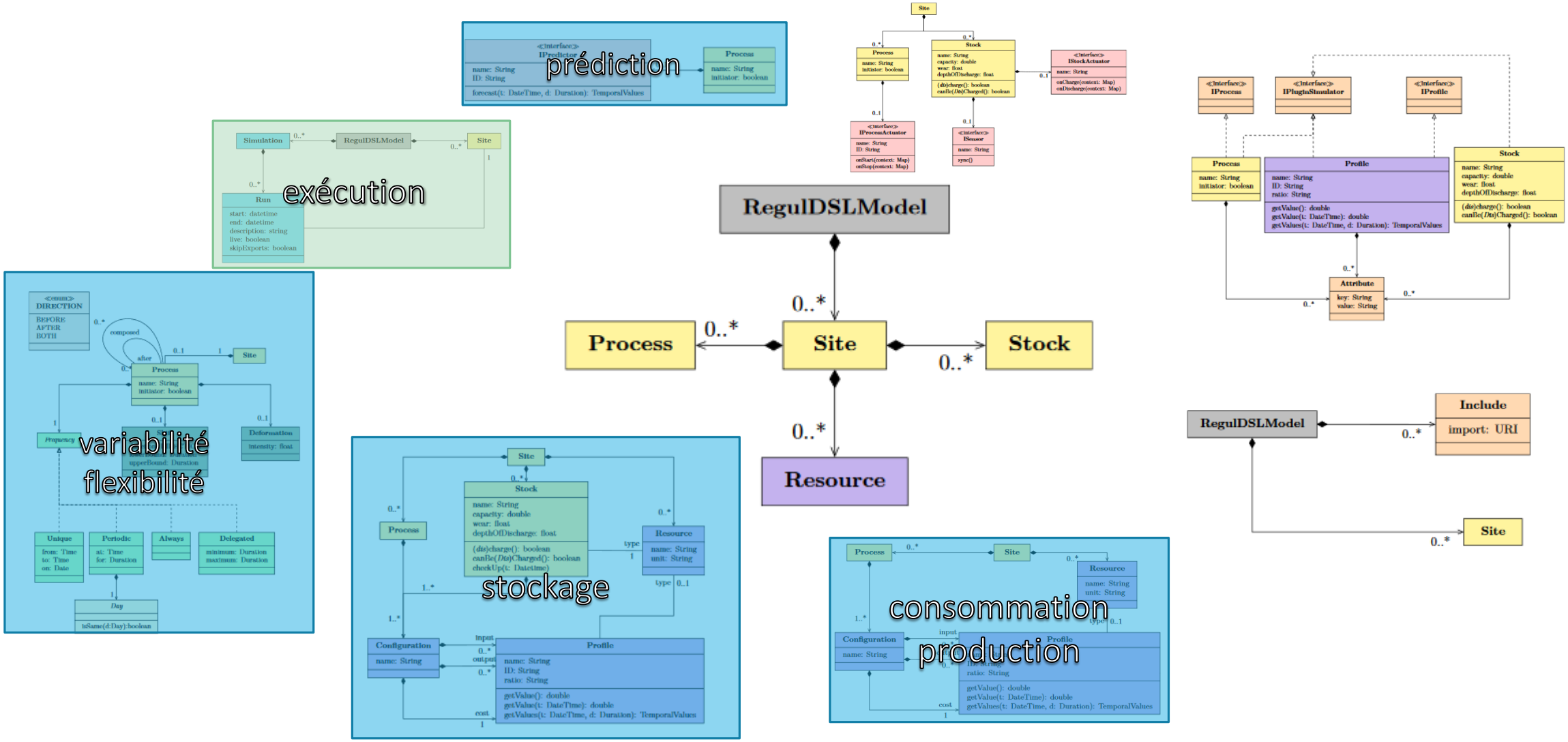
RegulDSL: metamodèle



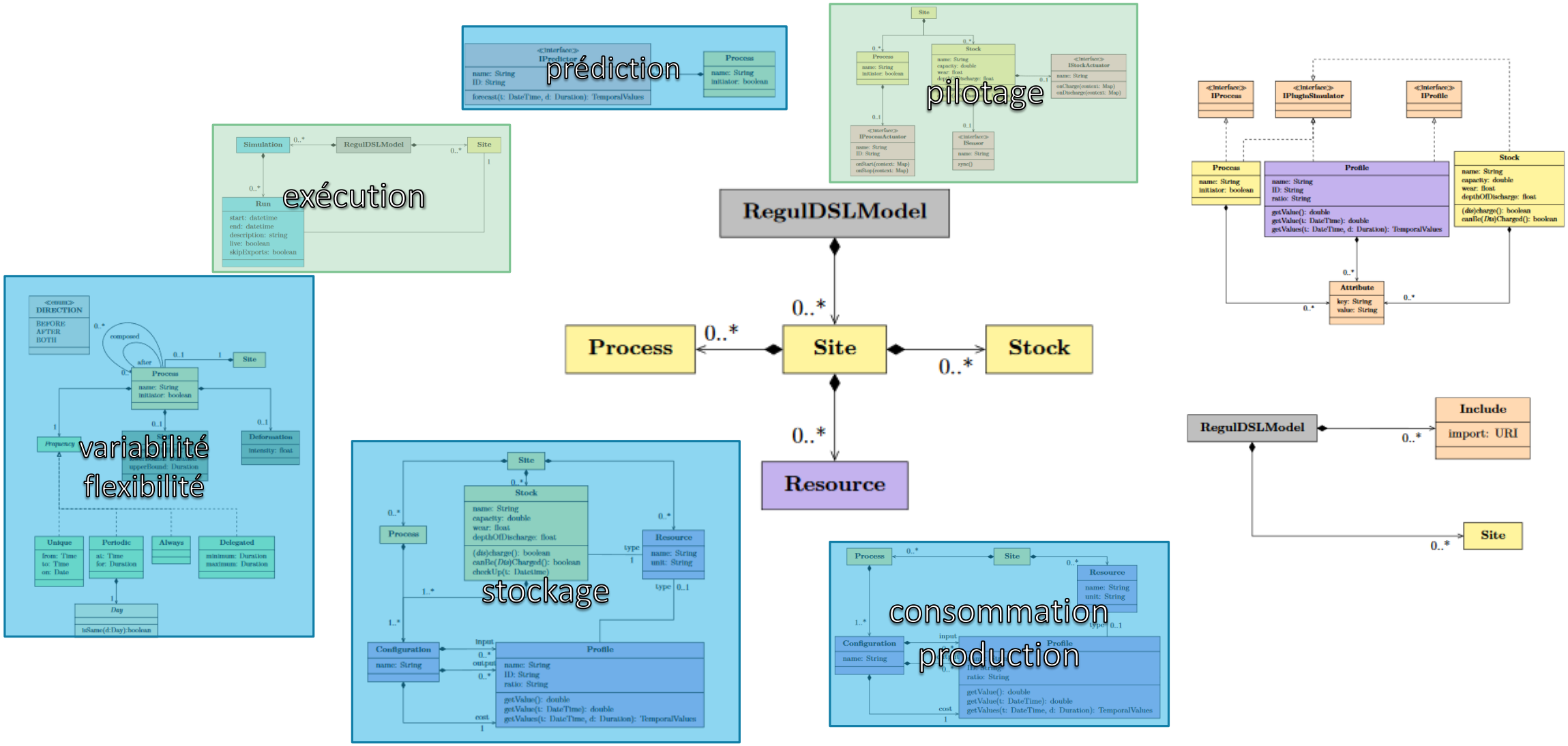
RegulDSL: metamodèle



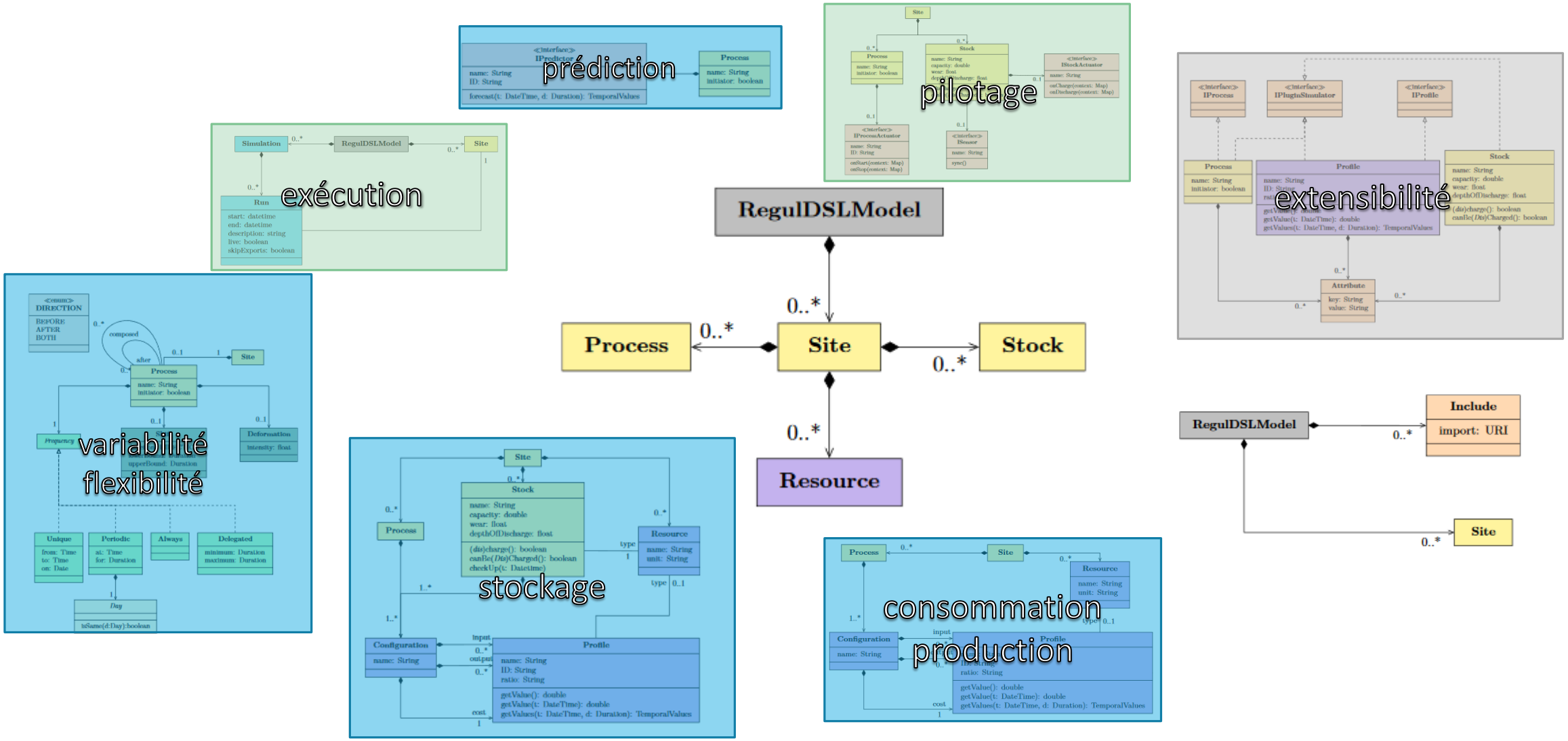
RegulDSL: metamodèle



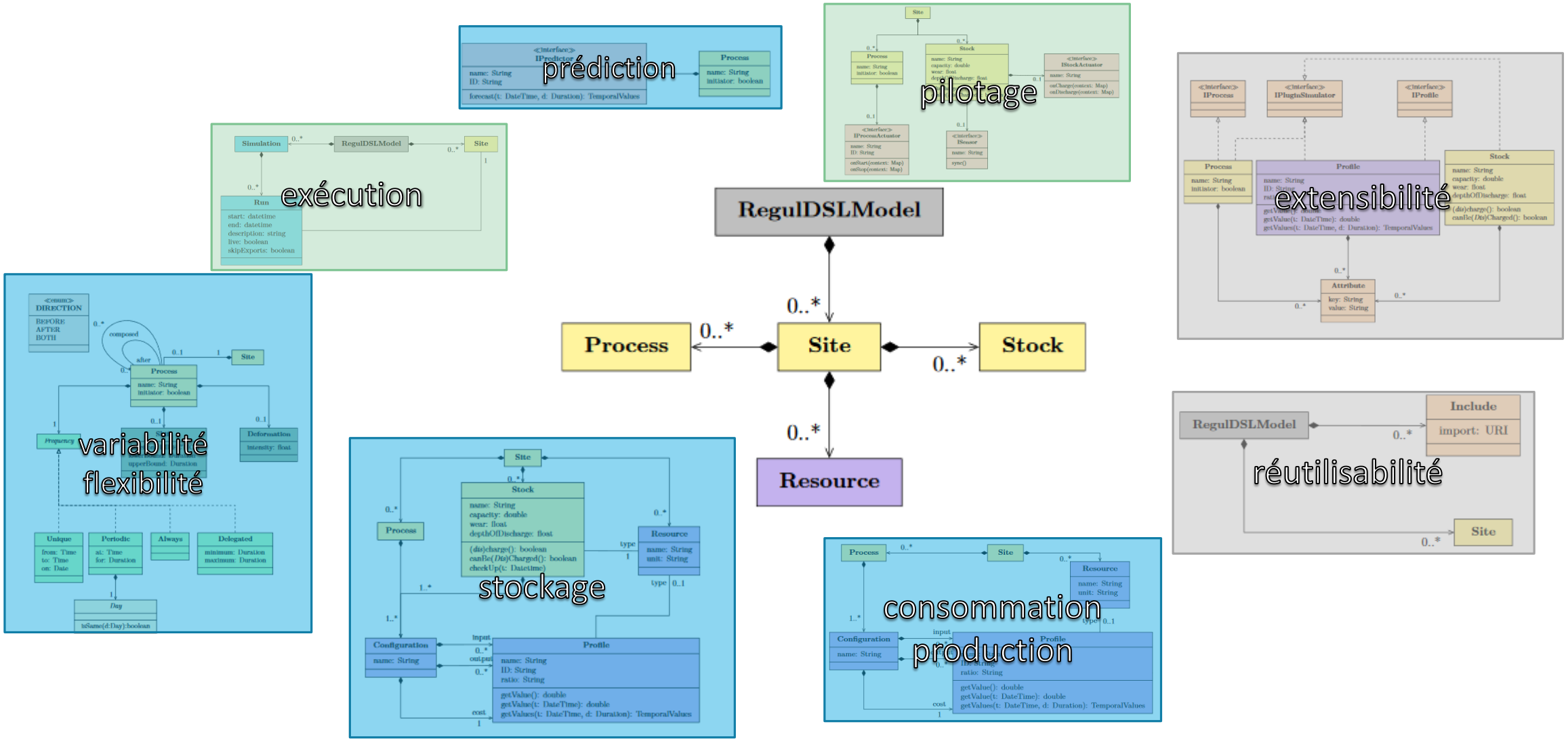
RegulDSL: metamodèle



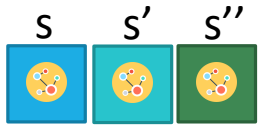
RegulDSL: metamodèle



RegulDSL: metamodèle



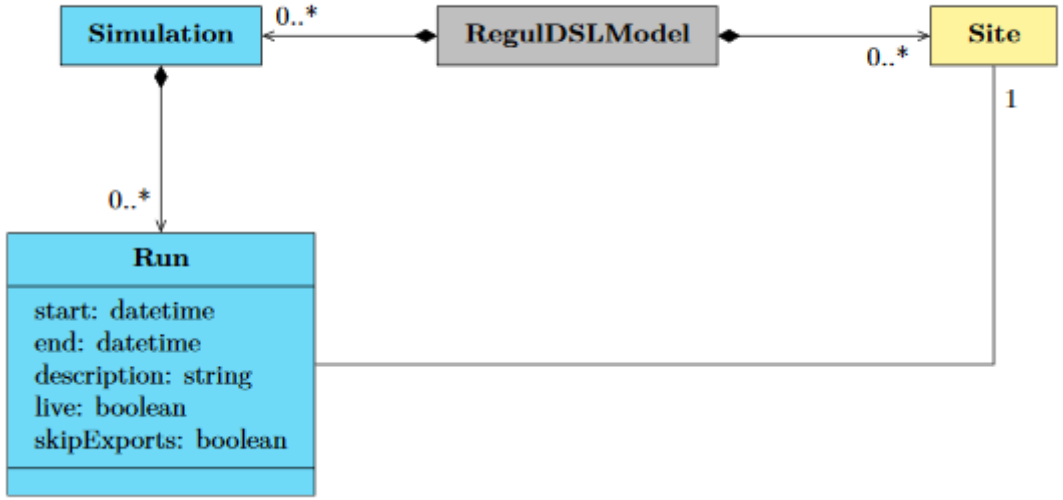
RegulDSL: exécution



Simulation : exploration

Temps-réel : pilotage

model@run.time



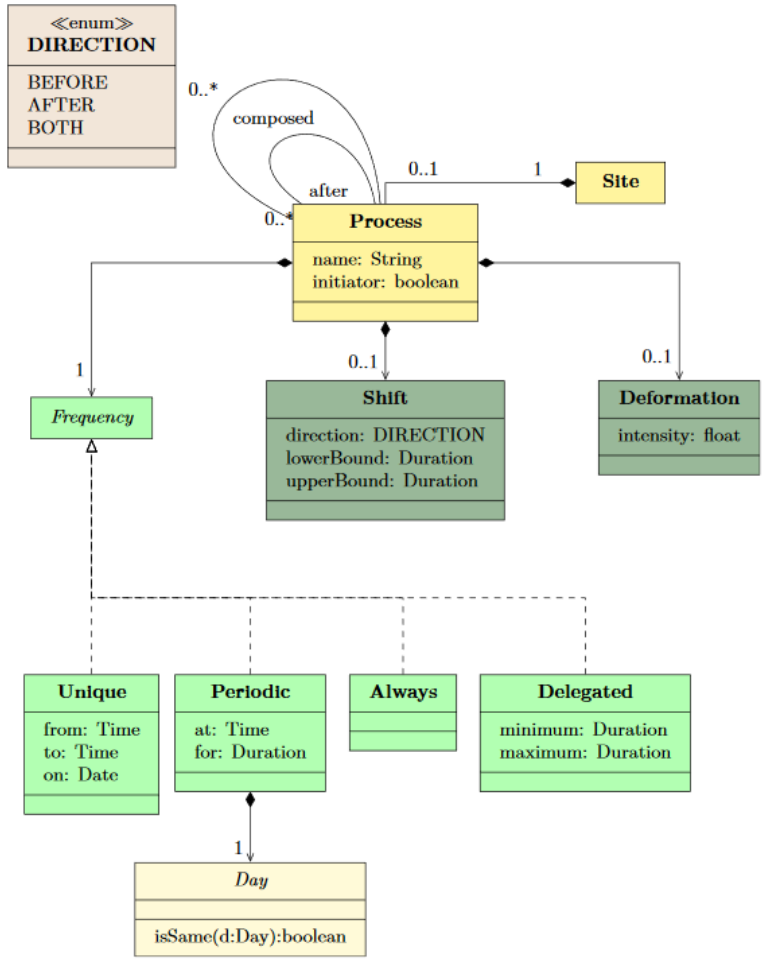
Sémantique opérationnelle: temps discret

RegulDSL: variabilité & flexibilité

Séquence: *« A vient après B»*

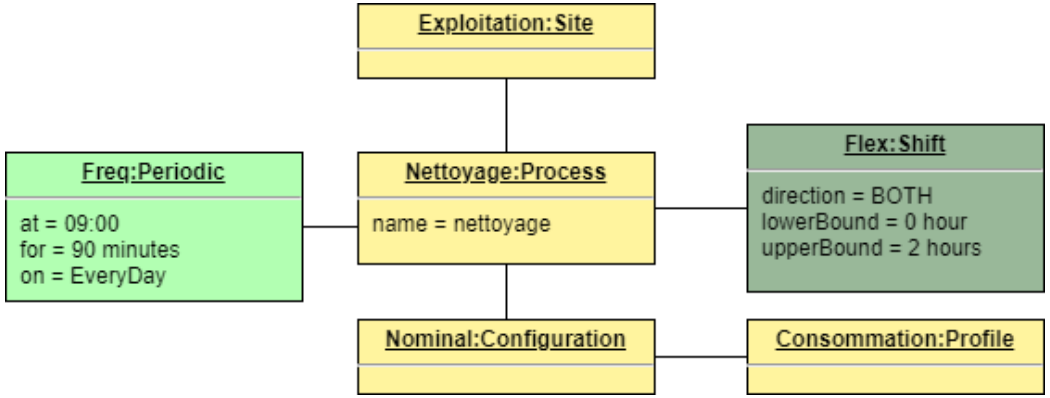
Flexibilité: *«A peut être décalé de X heures»*

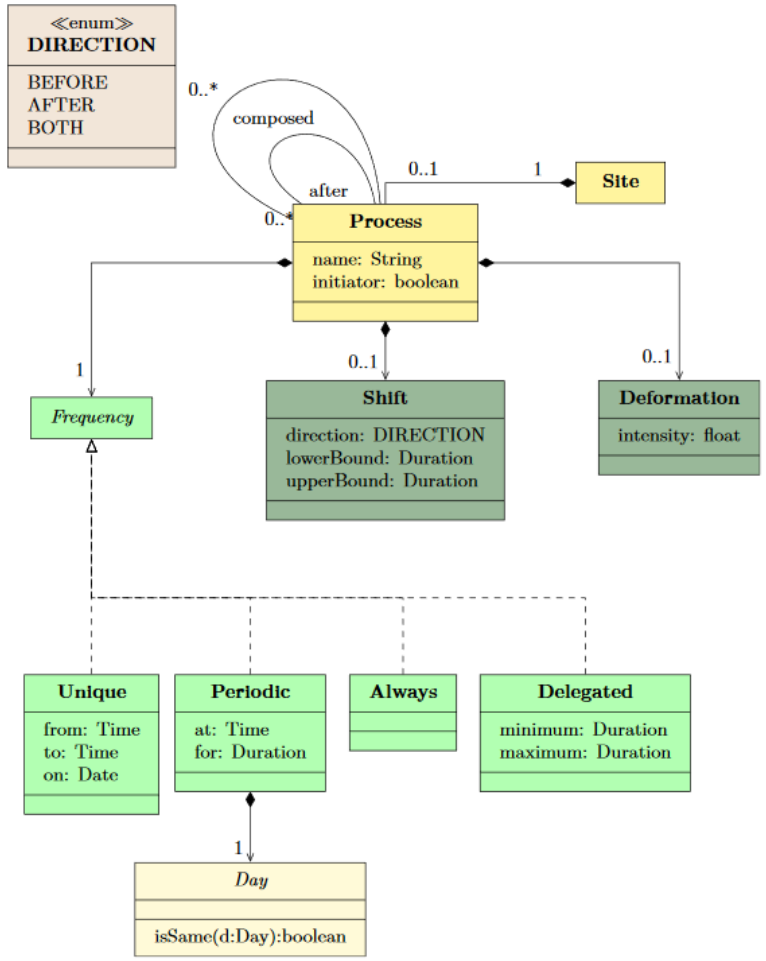
Répétition: *«A a lieu tous les lundis»*



RegulDSL: variabilité & flexibilité

Exemple:

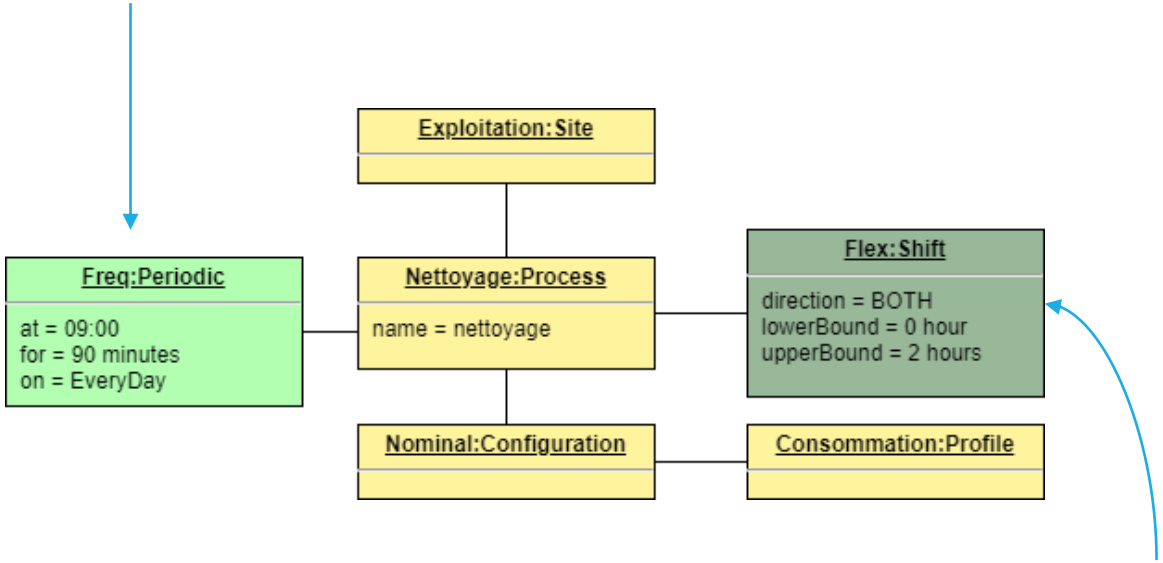




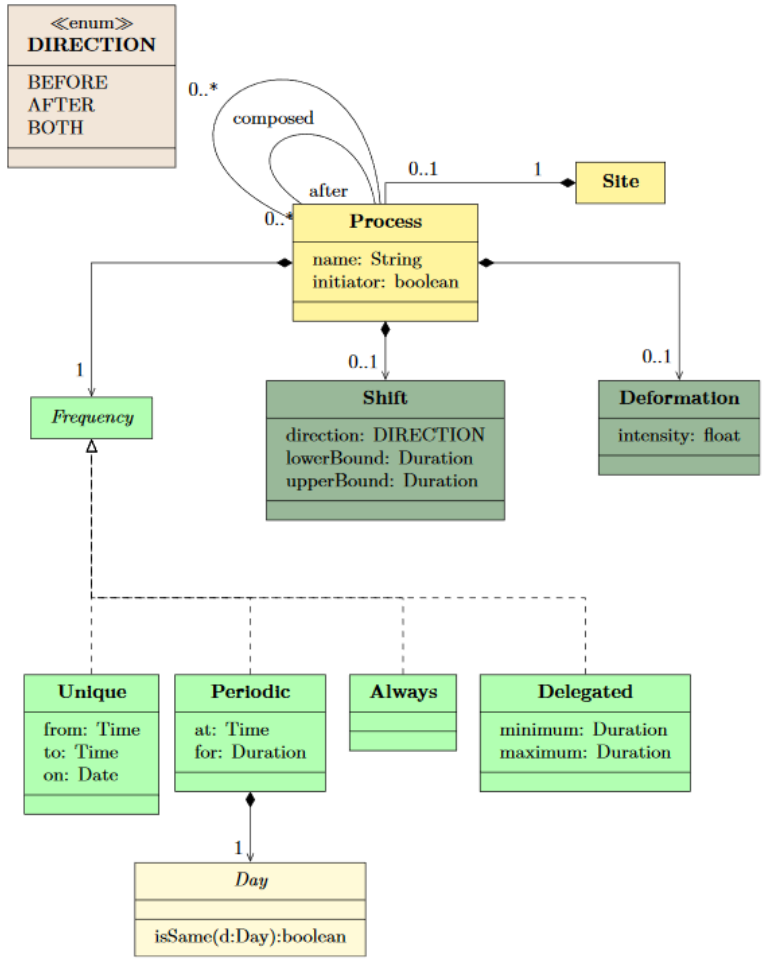
RegulDSL: variabilité & flexibilité

Exemple:

Le nettoyage *de la cuve* a lieu **tous les jours à 9h jusqu'à 10h30**



Il peut commencer **2 heures plus tôt ou plus tard**

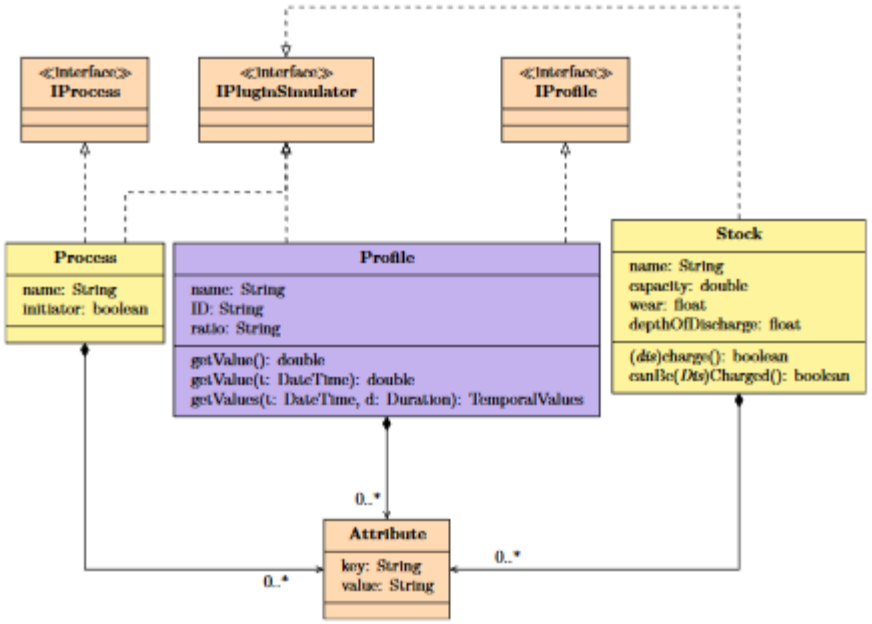


RegulDSL: extensibilité

Spécialisation extérieure

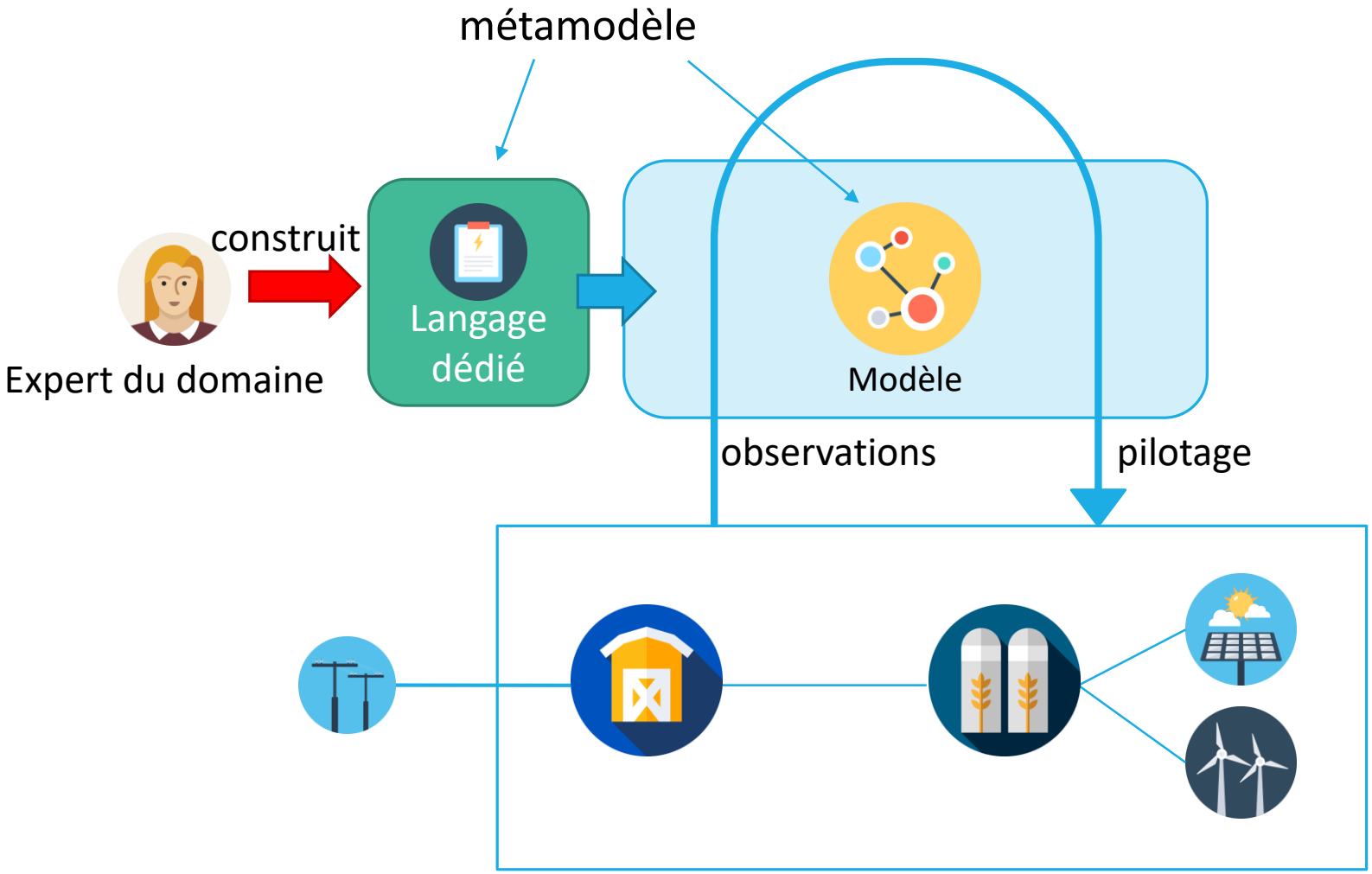
Points de variabilité du métamodèle:

- Sources de données
- Stockage
- Activité
- Pilotage et prédiction



Passage d'attributs à la construction du modèle

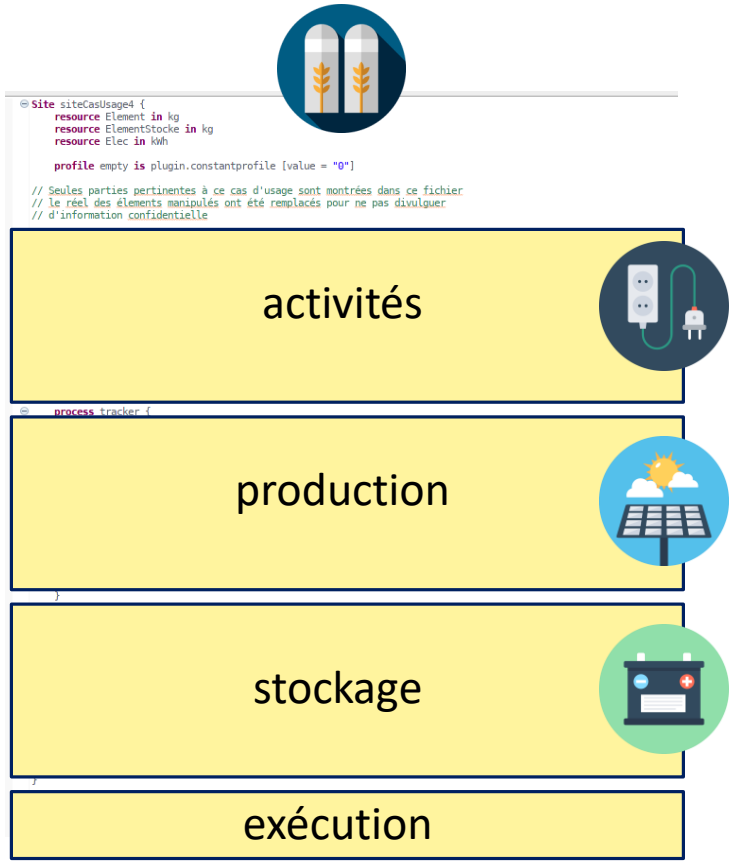
Langage dédié



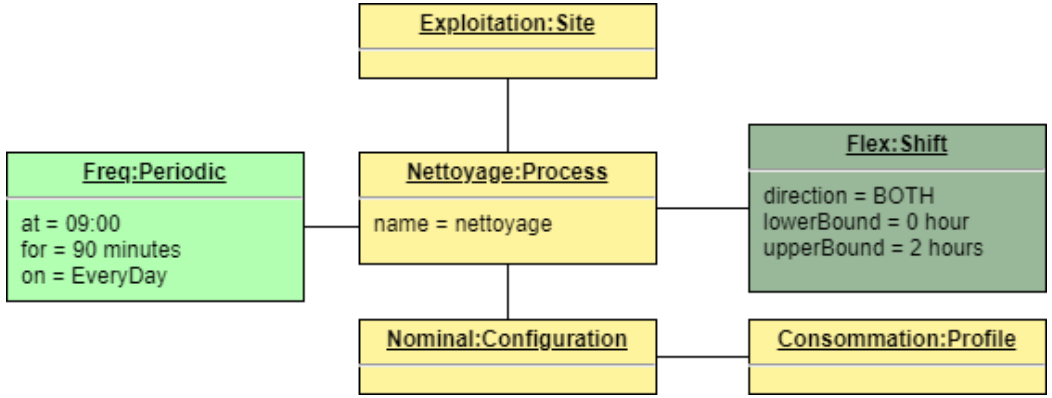
RegulDSL: grammaire

```
Site siteCasUsage4 {
    resource Element in kg
    resource ElementStocke in kg
    resource Elec in kWh

    profile empty is plugin.constantprofile [value = "0"]

 // Seules parties pertinentes à ce cas d'usage sont montrées dans ce fichier
 // le réel des élements manipulés ont été remplacés pour ne pas divulguer
 // d'information confidentielle

    process creation {
        configuration nominal {
            cost empty
            input {
                profile creaConso is plugin.constantprofile of Elec [value = "3500"]
            }
            output {
                profile crea is plugin.constantprofile of Element [value = "43.3"]
            }
        }
        frequency Delegated [ 5 minute ; ]
        actuator { stockactuator is plugin.stockactuator [target = "http://localhost:5000/"] }
    }

    process tracker {
        configuration nominal {
            cost empty
            input { }
            output {
                profile prod is plugin.liverestsensor of Elec [url = "http://localhost:4000/api/production"]}
        }
        frequency Always
        predictor {
            meteo is plugin.weatherforecastpredictor
            [
                plant_id = "313",
                power = "22000",
            ]
        }
    }

    stock tank of ElementStocke {
        capacity 640.0 uh
        depth 30.0 %
        configuration tankConfig {
            cost profile n
            input {
                profile tankInput is plugin.constantprofile of Element [value = "250"]
            }
            output {
                profile tankOutput is plugin.constantprofile of ElementStocke [value = "250"]
            }
        }
    }
}

Simulation {
    run siteCasUsage4 live liveSimulation
}
```

RegulDSL: grammaire



RegulDSL: exemple d’instance

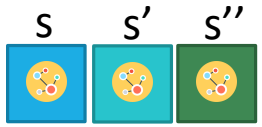



```
process nettoyage {
    after (utilisation) // séquence
    configuration nominal {
        input {
            profile consommation is plugin.timedcsvreader of Electricity
            [file = "./consommation.csv"] // lien aux données
        }
        output {} // consommation uniquement
    }
    frequency Periodic at 09:00 for 90 minute on everyday // variabilité
    shift direction BOTH between 0 hour and 2 hour // flexibilité

}
```

RegulDSL: optimisation

```
shift direction BOTH between 0 hour and 2 hour // flexibilité
```

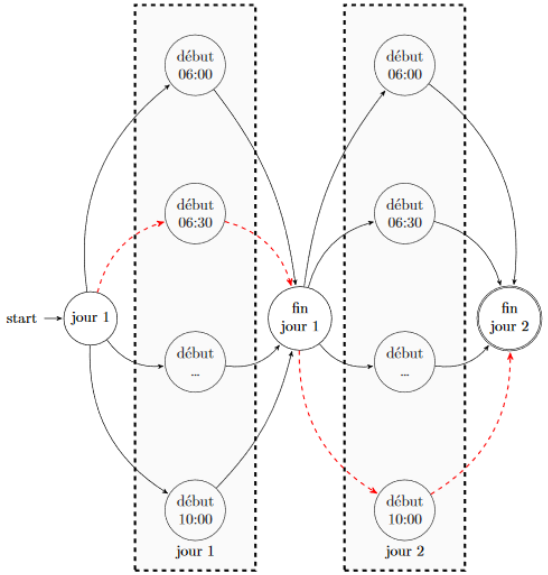
Construction de l'espace des solutions



Simulation et optimisation

Implémentations proposées:

- Earliest Deadline First [Moon]
- Breadth First Search
- A*



Implémentation et validation

- Implémentation
- Cas d’étude industriel

Implémentation

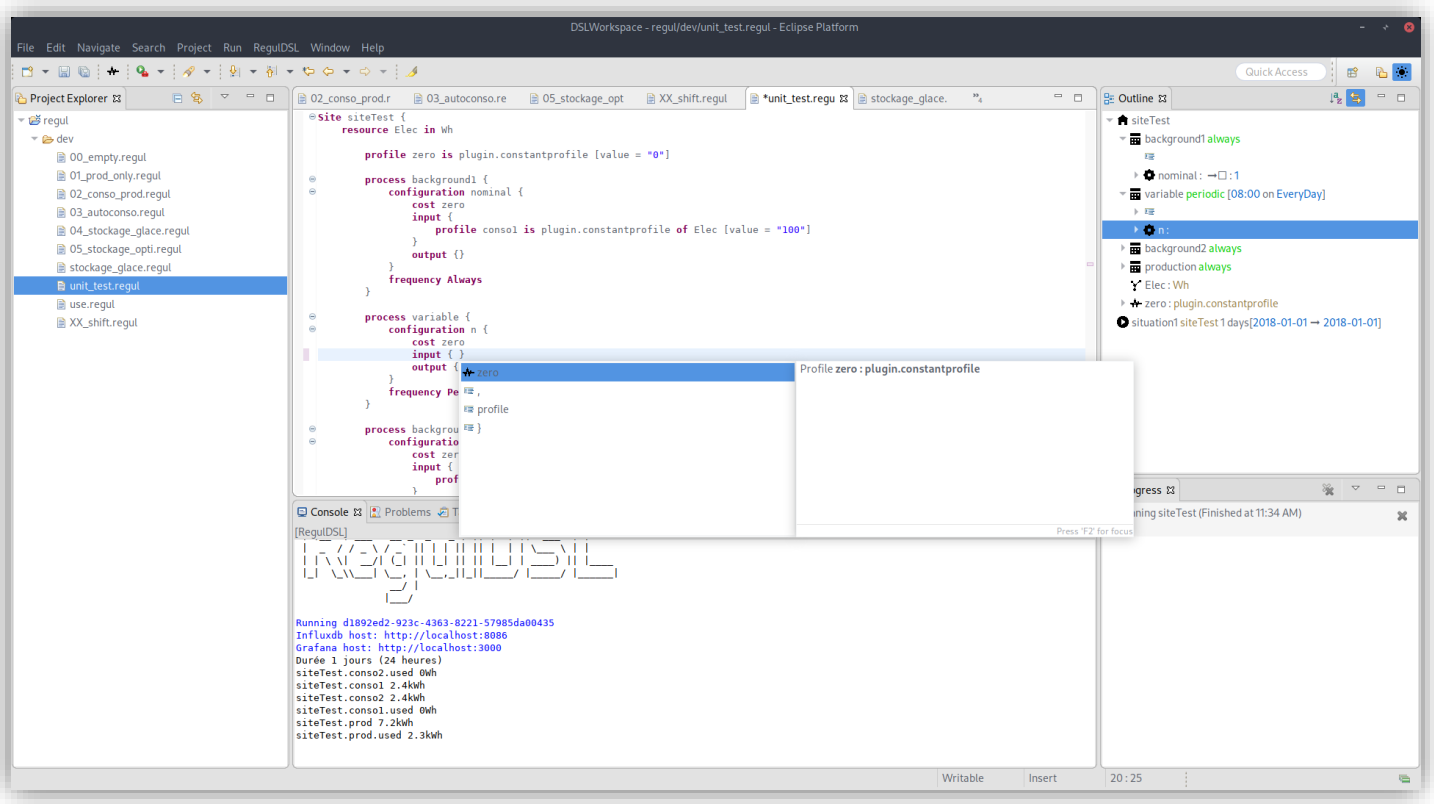
Metamodélisation : EMF

Grammaire : Xtext

Dynamisme : OSGi

7k LoC core

100k LoC générées



Éditeur spécialisé pour l’expert du domaine

Cas d’étude

1er cas : dimensionnement solaire	2ème cas : optimisation de la planification d’une activité
3ème cas : gestion du stockage	4ème cas : suivi temps réel, optimisation avec prédiction

Cas d'étude

1er cas : dimensionnement solaire

Critère	Existant	Proposition
Pré-traitement	Manuel	Automatisé
Simulation n	~1s et limité	~1min et plus complet
Simulation n'	duplication de données	facilité

2ème cas : optimisation de la planification d'une activité

Existant	Proposition
Estimation sur des tendances	Optimise en comparant des scénarios

3ème cas : gestion du stockage

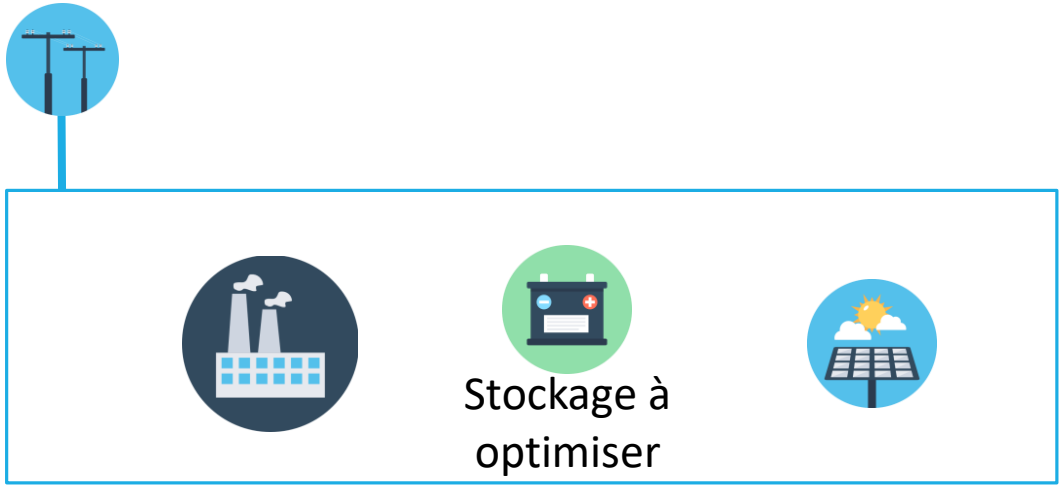
Existant	Proposition
Simplification du comportement	Plus de paramètres considérés (Pmax)

4ème cas : suivi temps réel, optimisation avec prédiction

Cas d’étude : appareil industriel

- 1 tracker solaire
- 1 service de prévision
- 1 besoin *d’eau chaude* à heure fixe matin et soir
- 1 stockage ≈2.5 plus grand que le besoin

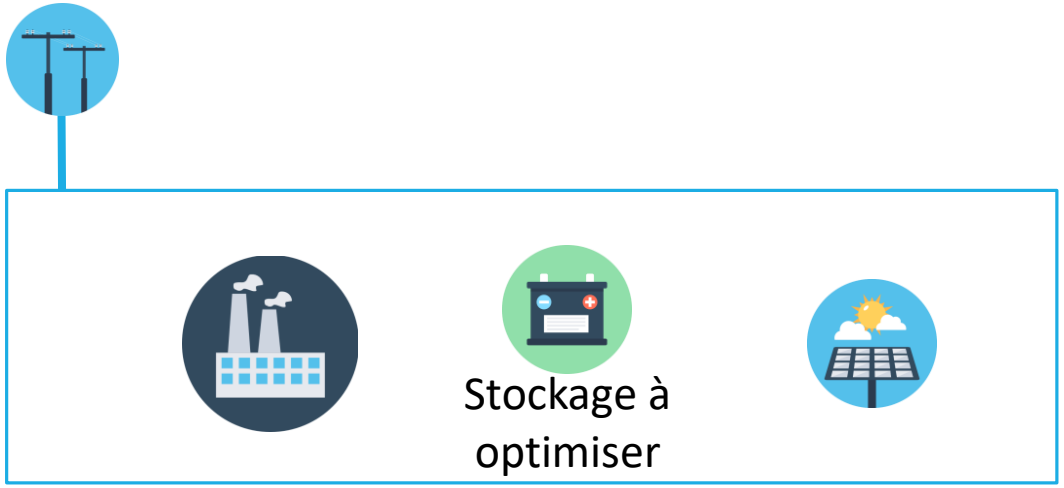
Rendements connus par l’expert



Cas d’étude : description

- 1 tracker solaire
- 1 service de prévision
- 1 besoin *d’eau chaude* à heure fixe matin et soir
- 1 stockage ≈2.5 plus grand que le besoin

Rendements connus par l’expert



Objectifs:

Prendre en compte le **besoin**

Tirer parti de la prévision et du stock

Produire au maximum pendant la production locale

Piloter et requêter le matériel

Cas d’étude : modélisation

90 lignes de DSL:

- Lien au matériel
- Aspects techniques (puissance)
- Contraintes et variabilité

Plugin spécifique : pilotage stockage

Plugin spécifique : lien à l’API de prévision

<100 LoC par plugin

```
Site siteCasUsage4 {
    resource Element in kg
    resource ElementStocke in kg
    resource Elec in kWh

    profile empty is plugin.constantprofile [value = "0"]

 // Seules parties pertinentes à ce cas d'usage sont montrées dans ce fichier
 // le réel des élements manipulés ont été remplacés pour ne pas divulguer
 // d'information confidentielle

    process creation {
        configuration nominal {
            cost empty
            input {
                profile creaConso is plugin.constantprofile of Elec [value = "3500"]
            }
            output {
                profile crea is plugin.constantprofile of Element [value = "43.3"]
            }
        }
        frequency Delegated [ 5 minute ; ]
        actuator { stockactuator is plugin.stockactuator [target = "http://localhost:5000/"] }
    }

    process tracker {
        configuration nominal {
            cost empty
            input { }
            output {
                profile prod is plugin.liverestsensor of Elec [url = "http://localhost:4000/api/production"]}
        }
        frequency Always
        predictor {
            meteo is plugin.weatherforecastpredictor
            [
                plant_id = "313",
                power = "22000",
            ]
        }
    }

    stock tank of ElementStocke {
        capacity 640.0 uh
        depth 30.0 %
        configuration tankConfig {
            cost profile n
            input {
                profile tankInput is plugin.constantprofile of Element [value = "250"]
            }
            output {
                profile tankOutput is plugin.constantprofile of ElementStocke [value = "250"]
            }
        }
    }
}

Simulation {
    run siteCasUsage4 live liveSimulation
}
```

Cas d’étude : modélisation

Rendement du stockage:

- Consommation de 3500W

```
process creation {
    configuration nominal {
        cost empty
        input {
            profile creaConso is plugin.constantprofile of Elec [value = "3500"]
        }
        output {
            profile crea is plugin.constantprofile of Element [value = "43.3"]
        }
    }
    frequency Delegated [ 5 minute ; ]
    actuator { stockactuator is plugin.stockactuator [target = "http://localhost:5000/"] }
}
```

Cas d’étude : modélisation

Variabilité:

- Libre au pas 5 minutes

  (contrainte physique)

```
process creation {
    configuration nominal {
        cost empty
        input {
            profile creaConso is plugin.constantprofile of Elec [value = "3500"]
        }
        output {
            profile crea is plugin.constantprofile of Element [value = "43.3"]
        }
    }
    frequency Delegated [ 5 minute ; ]
    actuator { stockactuator is plugin.stockactuator [target = "http://localhost:5000/"] }
}
```

Cas d’étude : modélisation

Actionneur:

- Chargement dynamique de plugin
- Paramétrage du plugin depuis le DSL

```
process creation {
    configuration nominal {
        cost empty
        input {
            profile creaConso is plugin.constantprofile of Elec [value = "3500"]
        }
        output {
            profile crea is plugin.constantprofile of Element [value = "43.3"]
        }
    }
    frequency Delegated [ 5 minute ; ]
    actuator { stockactuator is plugin.stockactuator [target = "http://localhost:5000/"] }
}
```

Cas d’étude : optimisation

À partir du besoin :

- Calcul du fonctionnement minimal
- Constructions des scénarios possible
- Évaluation et exploration par rapport à la prévision

Cas d’étude : résultats

15 jours de pilotage sur site

Heure de début et durée à optimiser

- Production minimale
- Stockage à faible coût

Le stock couvre toujours le besoin

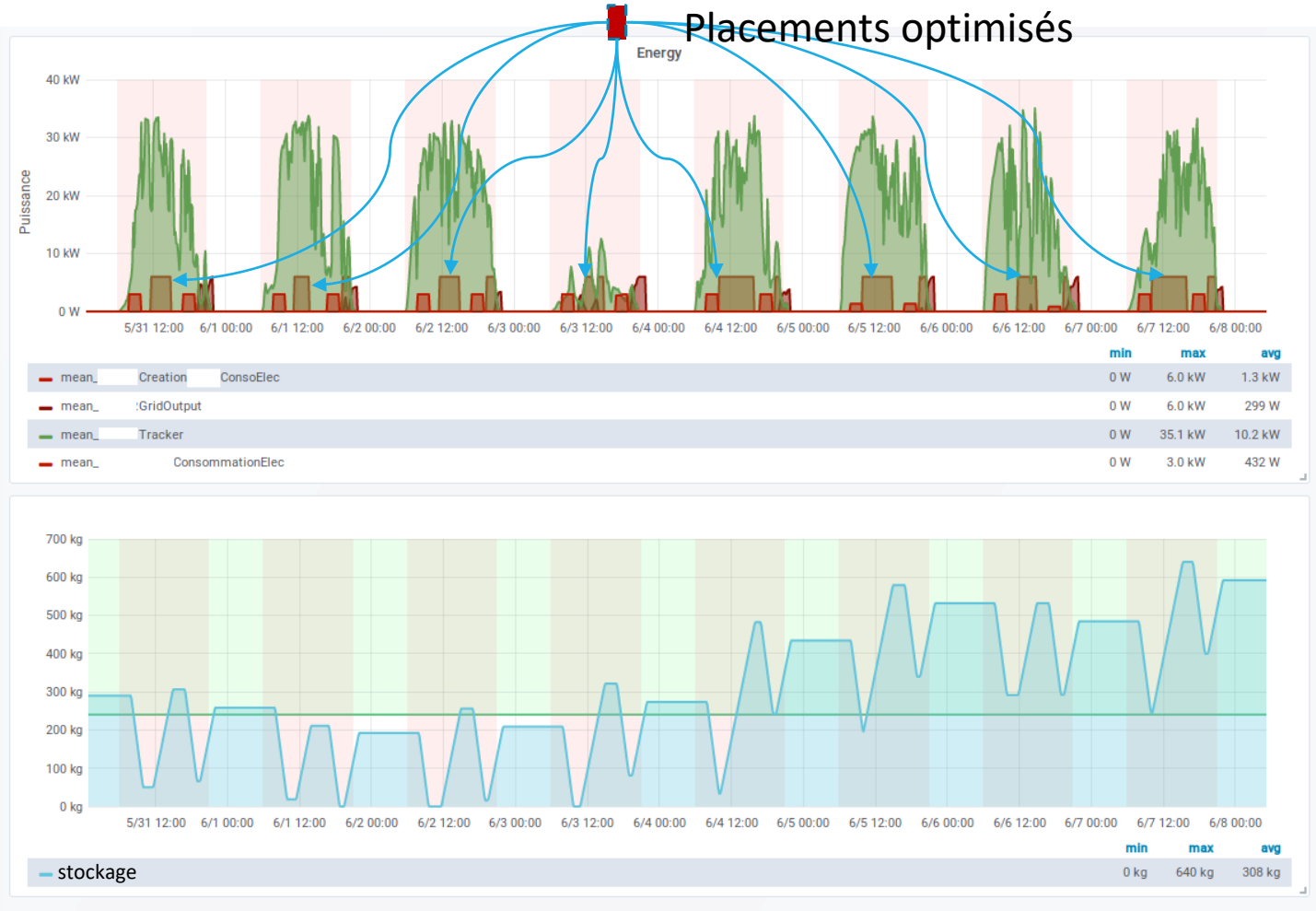
Cas d'étude : résultats

15 jours de pilotage

Heure de début et durée à optimiser

- Production minimale
- Stockage à faible coût

Le stock couvre toujours le besoin



Validation : synthèse

L'approche MDE permet une

- séparation données/traitements
- traçage des simulations
- même modèle en simulation/pilotage

Réutilisabilité des modèles construits

Formation au DSL ½ journée

Stack technique (évolution métamodèle, plugin)

Conclusion

- Synthèse
- Perspectives

Conclusion

❶ Quelles sont les bonnes **abstractions** ?

Proposition :

- métamodèle outillé axé variabilité, flexibilité et extensibilité
- validé sur des cas d’usage réels
- utilisé par le partenaire industriel

Conclusion

❷ Comment **simuler** une microgrille ?

Proposition :

Jumeau Numérique **extensible** capable de gérer la diversité des appareils sous couvert de pouvoir discrétiser le profil de consommation énérgétique de moyens de production ou de consommation

Conclusion

❸ Comment **optimiser** l’usage des énergies renouvelables ?

Proposition :

- Interface clairement définie des points de variabilité au sein d'un modèle
  - extensible pour ajout d’algorithmes
  - utilisation de l'algorithme A*
  - application de ces optimisations sur des cas réels

Conclusion

❹ Comment appliquer ces optimisations (**conseil/pilotage**) ?

Proposition :

- utilisation industrielle des conseils d'optimisation
- architecture à plugins pour l'intégration des appareils physiques

Conclusion

Un Jumeau Numérique, une architecture extensible et unifiée pour améliorer l'efficacité énergétique des microgrilles.

Accessible au travers d'un langage dédié

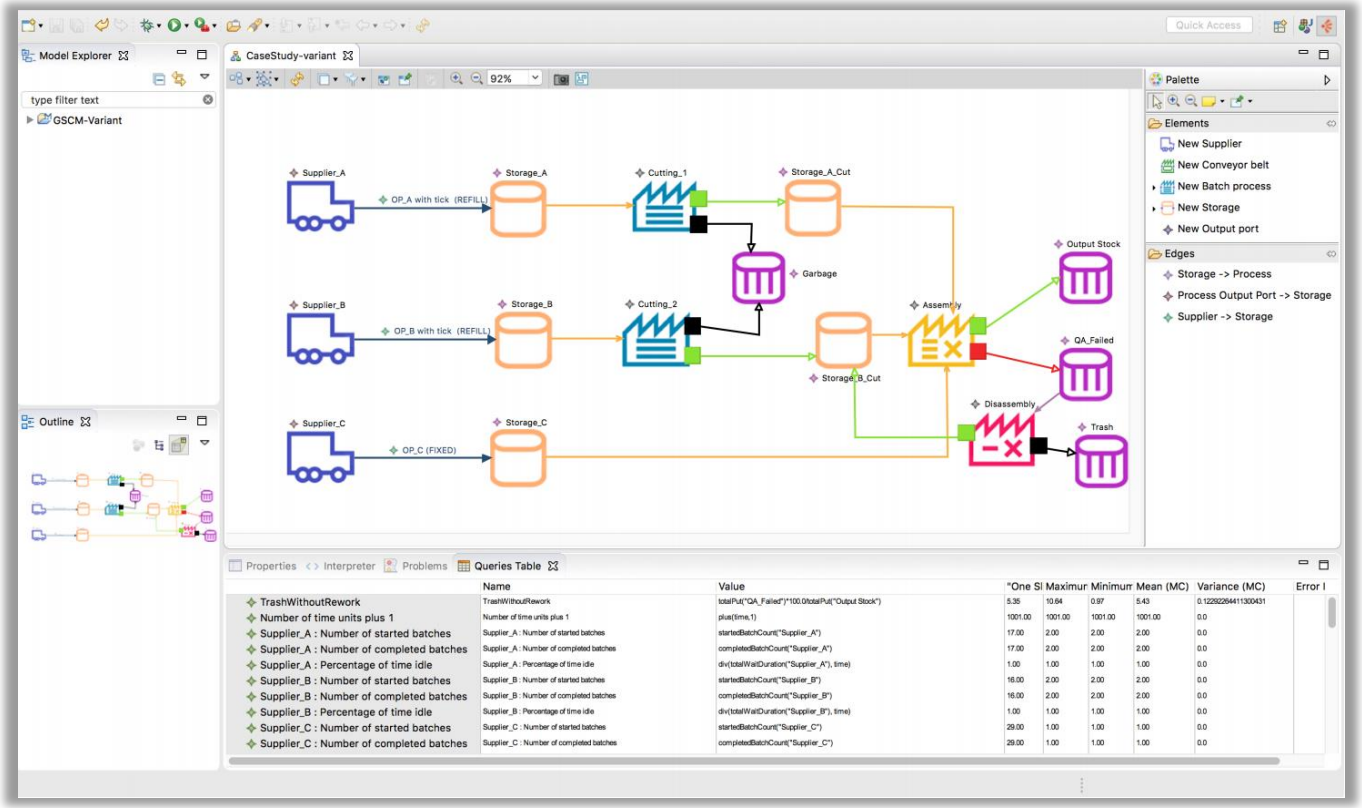
En mesure de :

- **Simuler** le comportement des équipements
- Explorer des scénarios d'**optimisation** (Demand Response)
- **Piloter** les appareils existants

Conclusion: travaux futurs

Ingénierie:

- Langage dédié graphique (Sirius)
- Intégration à un éditeur web (Theia)



Gallerie Sirius

Conclusion: perspectives

Système autonomique, intégration à l’humain:

- Boucle fermée

- Présentation des conseils

- Incertitude des modèles représentant les conditions initiales et réconciliation

Modélisation de l'incertitude

- Propagation de ces incertitudes (prévision météo, précision des capteurs, abstraction des profils de consommation des machines, …) en phase de simulation
- Prise en compte de cette incertitude dans la boucle autonomique

Plateforme de benchmarking pour l’optimisation d’énergie

Questions ?

Alexandre RIO, Yoann MAUREL, Olivier BARAIS et Yoran BUGNI « *Efficient use of local energy :An activity oriented modeling to guide Demand Side Management* » à **MODELS 2018**

Alexandre RIO, Yoann MAUREL, Yoran BUGNI et Olivier BARAIS, « *Benefits of Energy Mana-gement Systems on local energy efficiency, an agricultural case study* », à **SmartGridComm 2019**

Invité à présenter aux Journées nationales du Groupement de Recherche Génie de la Programmation et du Logiciel **GDR GPL 2019**

Merci pour votre attention

Annexes

GreyCat

Structure de graphes temporelles pour l'apprentissage

Cas d'usage sur la grille du Luxembourg:

- Détection d'anomalies en temps réel
- Prédiction d'évolution des composantes électriques (matériel)

Défis d’un gestionnaire d’énergie

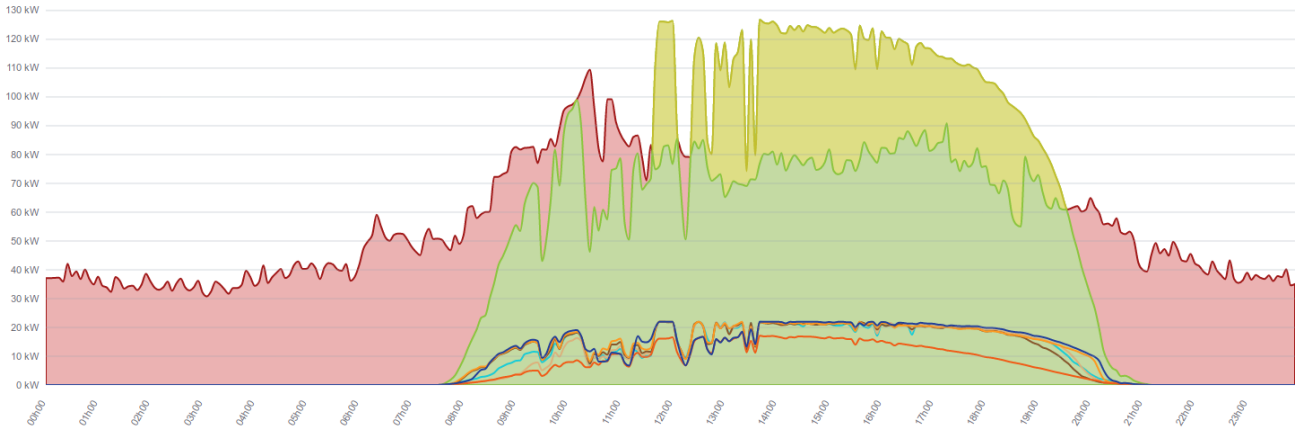
- **Hétérogénéité** des appareils communicants
- **Diversité** des moyens de stockage
- Nombreux algorithmes d’optimisation
- Évolution rapide du matériel
- Contraintes humaines et environnementales

Dimensionnement : critères

Rentabilité **économique** : performance des installations

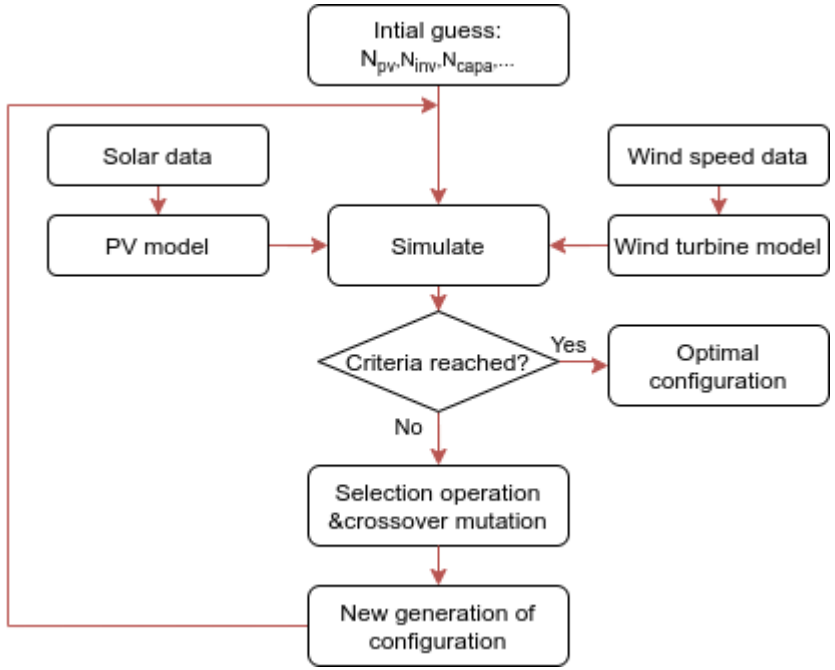
Autoconsommation : taux d'utilisation des générateurs

Autonomie: indépendance à la grille, réduction de facture



Exemple de journée avec production solaire

Dimensionnement

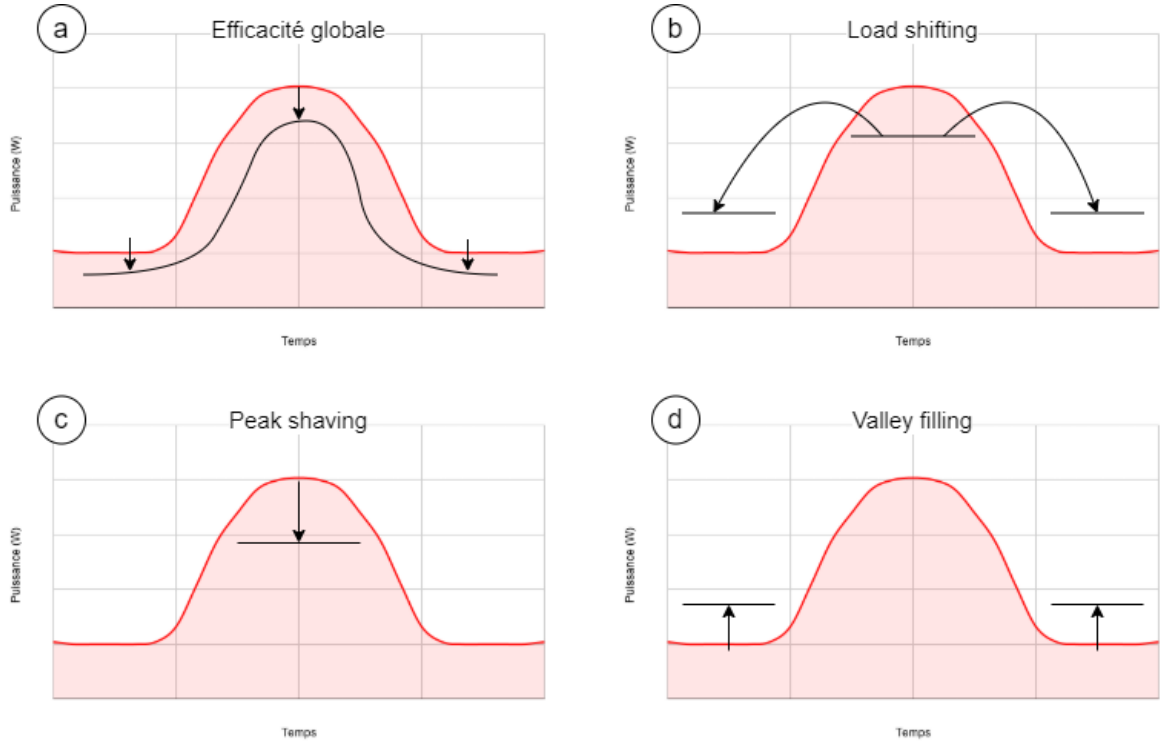


Dimensionnement multi sources selon [Tégani2014]

Approche génétique afin de déterminer les quantités idéales

Les critères sont arbitraires et dépendent de la situation

Optimisation: agir sur la consommation



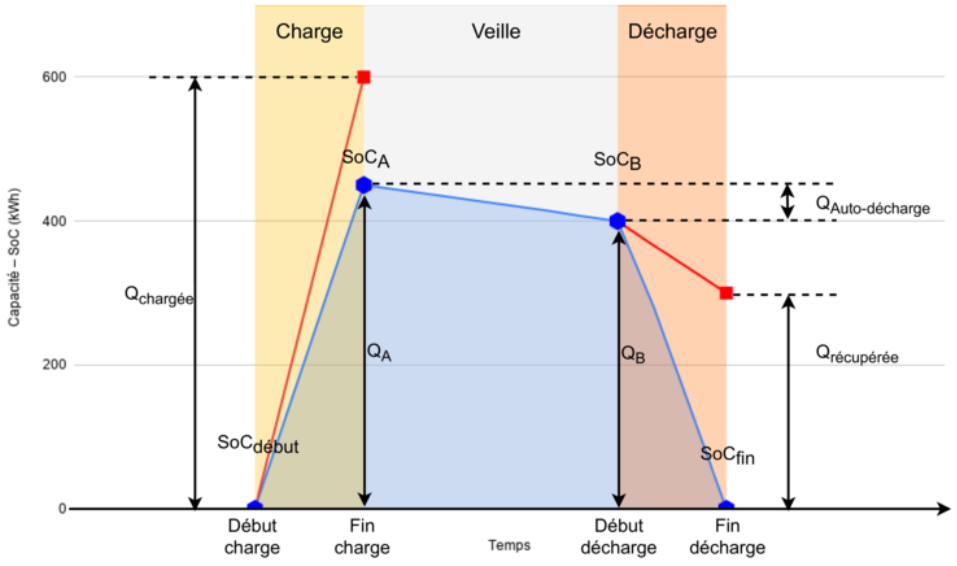
Actions sur la consommation, inspiré de [Macedo2015]

a) Efficacité globale

b) Déplacement d'activités

c) & d) Utilisation de batteries

Optimisation: utilisation de batteries

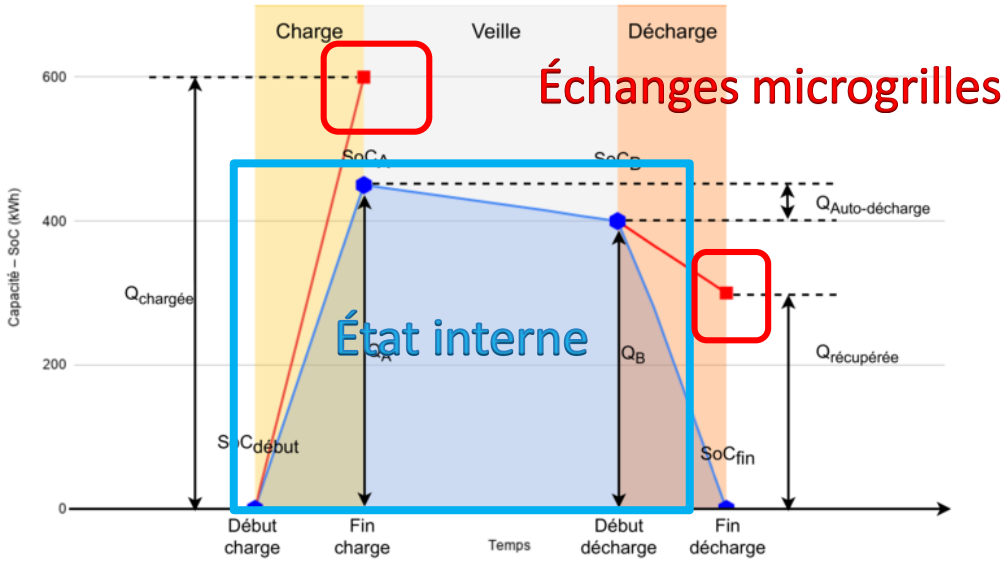


Approche simplifiée: cycle de charge, inspiré de [Alharbi2018]

1. Modèles physiques: température, tension par cellules etc

2. Modèles mathématiques simplifiés: quantités échangées et efficacité énergétique

Optimisation: utilisation de batteries

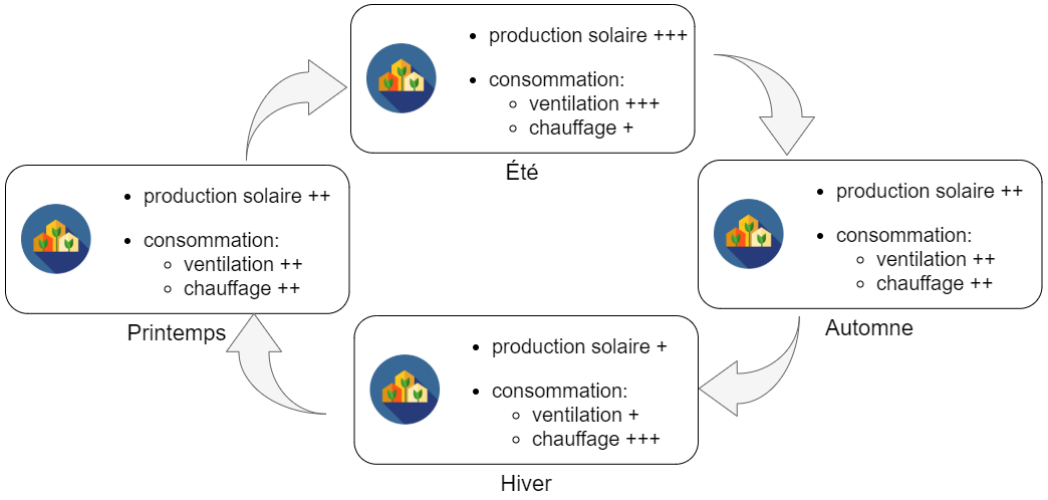


Approche simplifiée: cycle de charge, inspiré de [Alharbi2018]

1. Modèles physiques: température, tension par cellules etc

2. Modèles mathématiques simplifiés: quantités échangées et efficacité énergétique

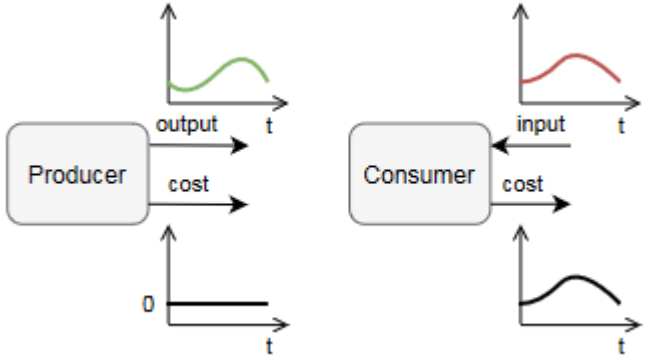
Optimisation: activités

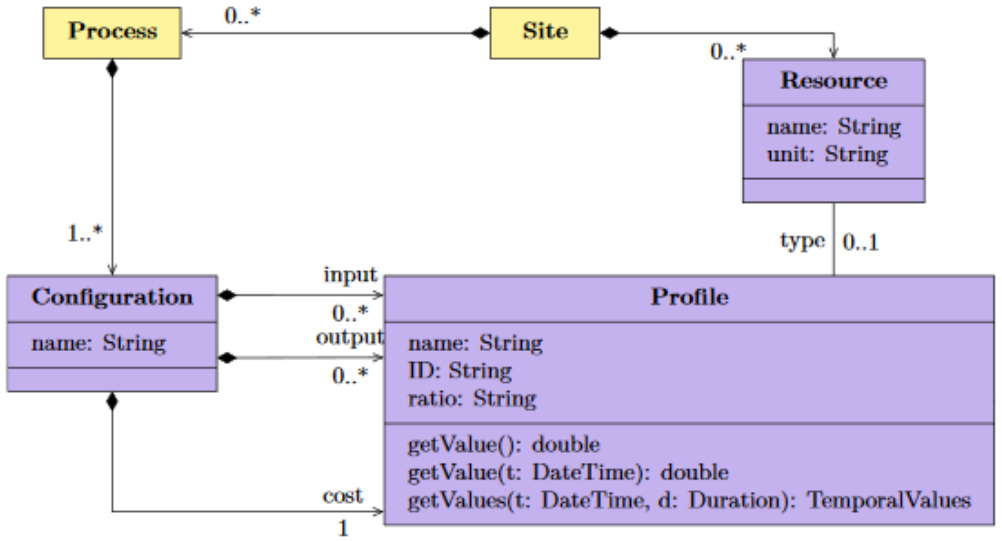


Les machines dépendent de leur environnement

Importance des saisonnalités [Abt2010]

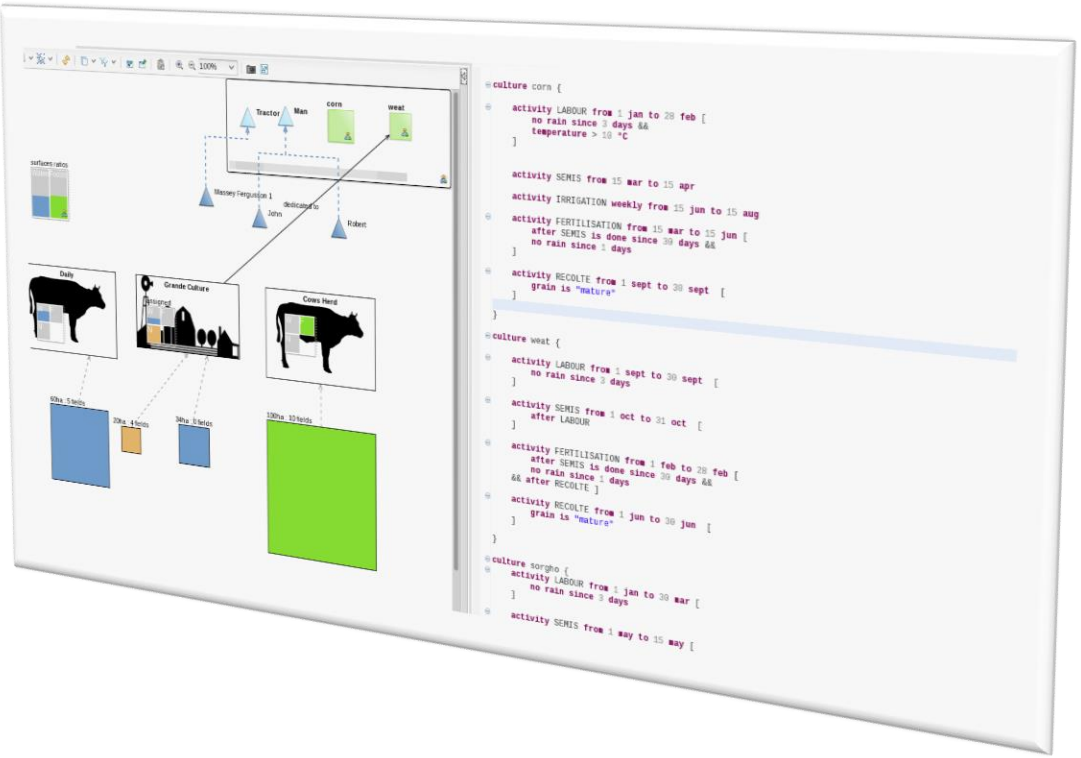
Représentation des données





Approches DSL

Appliquer au milieu agricole [Bruel2015] pour estimer le besoin en eau des cultures

À destination de scientifiques INRA non informaticiens

Utilisation de données issues du terrain et de modèles mathématiques