28 ET 29 OCTOBRE
A DIJON

17ÈME COLLOQUE
CIBE
Energie des territoires
BOIS-ÉNERGIE

COLLOQUE

Le Bois-énergie : Une dynamique de l'innovation



AVEC LE FINANCEMENT DE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

RÉGION BOURGOGNE FRANCHE COMTE

AVEC LA CONTRIBUTION DE

FEDERREC

HARGASSNER

SOVEN

EN PARTENARIAT AVEC

atee
ASSOCIATION TECHNIQUE ENERGIE ENVIRONNEMENT

BIOenergie International

CFP
CHAUD • FROID • PERFORMANCE

FORESTOPIC

GC GÉNIE CLIMATIQUE MAGAZINE

LE JOURNAL DES ENERGIES RENOUVELABLES

ThermPresse média

CIBE Energie des territoires 20 ans

COLLOQUE

Le Bois-énergie : Une dynamique de l'innovation

STOCKAGE THERMIQUE

Stockage thermique et systèmes complexes

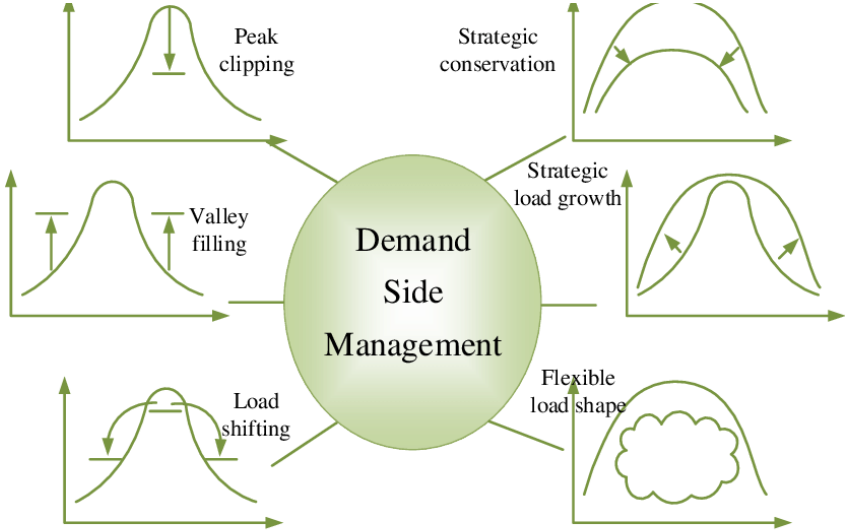
Arnaud BRUCH – Ingénieur de recherche
CEA Grenoble - Direction des Énergies (DES)
Service Systèmes Energétiques pour les Territoires et l'Industrie
Laboratoire des Composants et Systèmes Thermiques
Arnaud.bruch@cea.fr

Quelques utilisations du stockage thermique

Quelques fonctions du stockage de chaleur et applications

Quelques utilisations du stockage thermique

Quelques fonctions du stockage de chaleur et applications



https://energycentral.com/c/gn/how-important-load-shifting-microgrids

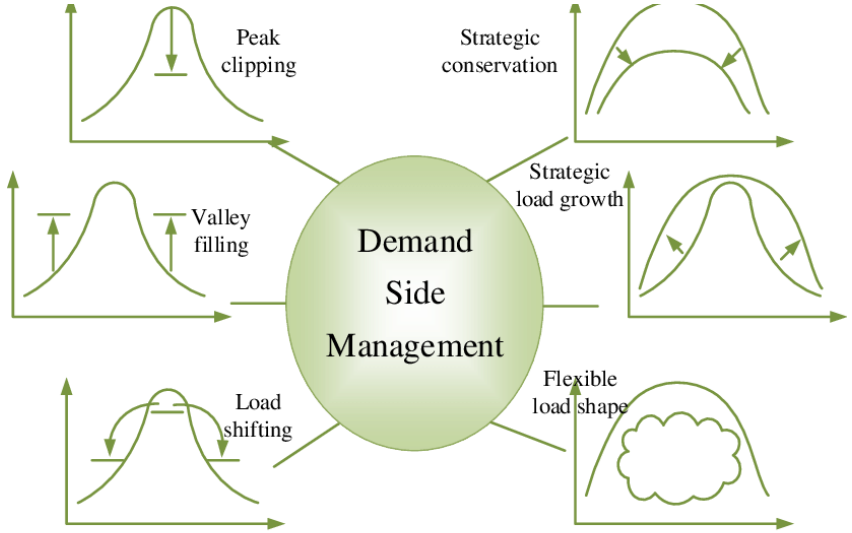
Quelques utilisations du stockage thermique

Quelques fonctions du stockage de chaleur et applications

Réseau de chaleur urbain



< 180°C



https://energycentral.com/c/gn/how-important-load-shifting-microgrids

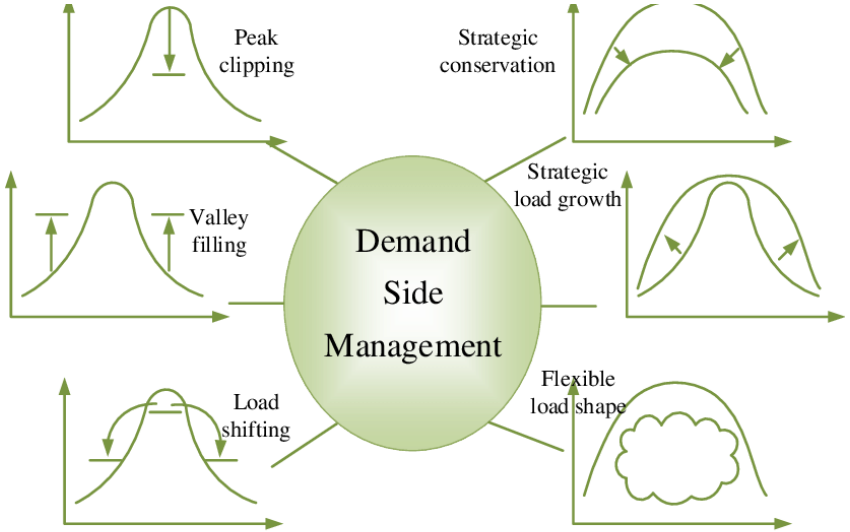
Quelques utilisations du stockage thermique

Quelques fonctions du stockage de chaleur et applications

Réseau de chaleur urbain

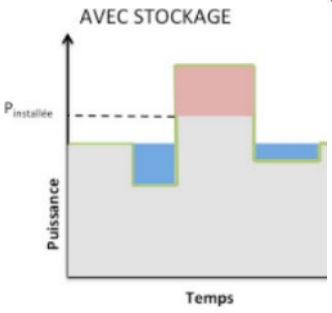


< 180°C

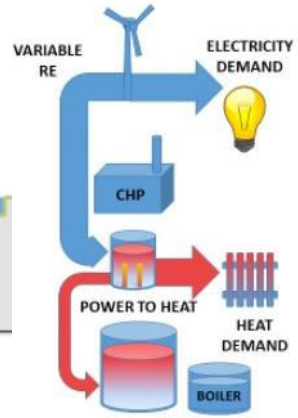


https://energycentral.com/c/gn/how-important-load-shifting-microgrids

Industrie/Réseaux



Lissage et flexibilité



P2H sur surplus élec

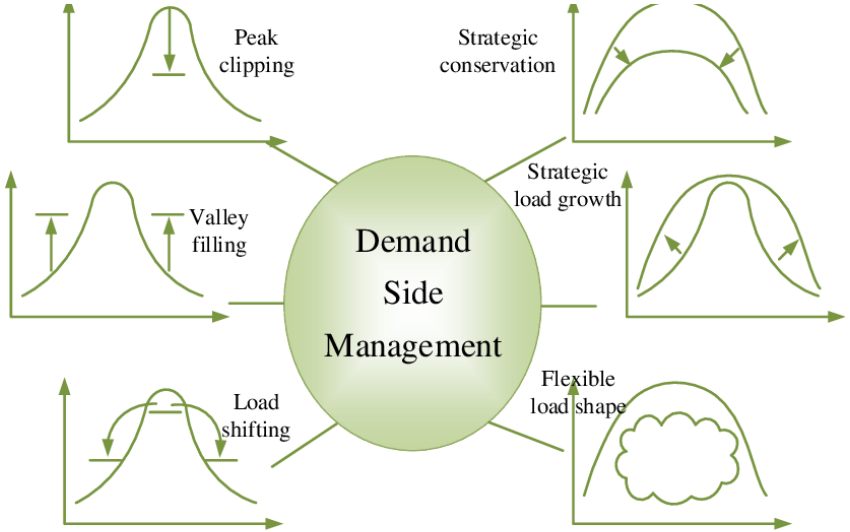
Quelques utilisations du stockage thermique

Quelques fonctions du stockage de chaleur et applications

Réseau de chaleur urbain

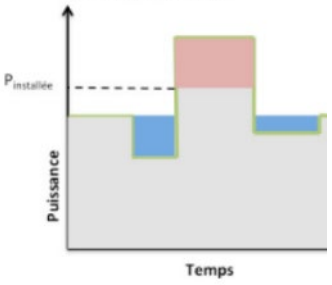


< 180°C

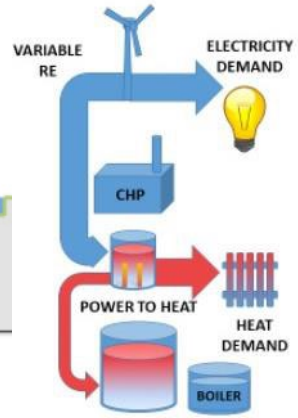


https://energycentral.com/c/gn/how-important-load-shifting-microgrids

Industrie/Réseaux



Lissage et flexibilité



P2H sur surplus élec

SMR



<500°C

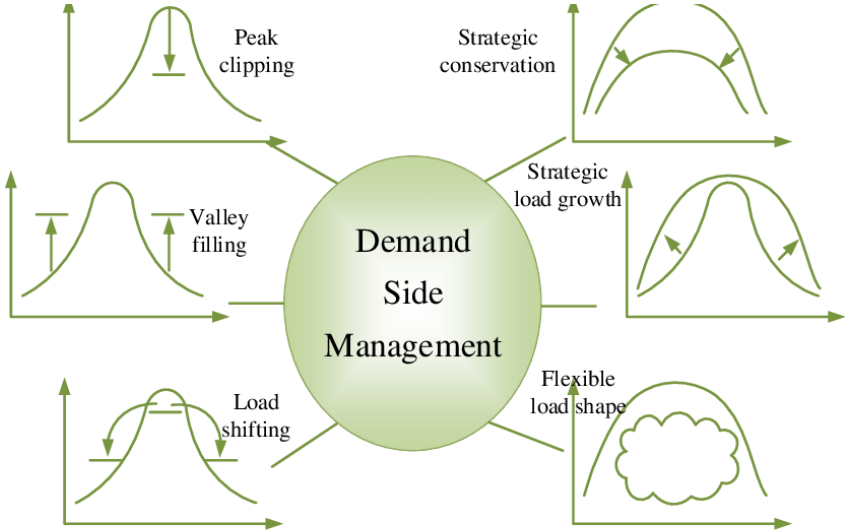
Quelques utilisations du stockage thermique

Quelques fonctions du stockage de chaleur et applications

Réseau de chaleur urbain

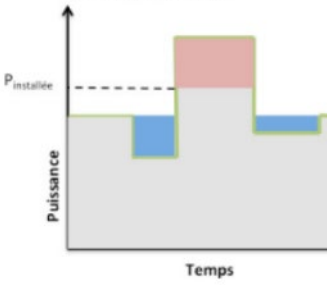


< 180°C

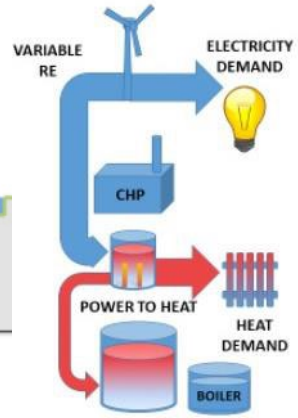


https://energycentral.com/c/gn/how-important-load-shifting-microgrids

Industrie/Réseaux



Lissage et flexibilité



P2H sur surplus élec

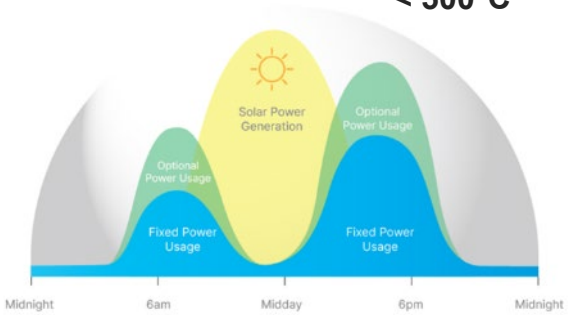
SMR

<500°C



Chaleur solaire

< 500°C



https://www.powerpal.net/blog/load-shifting-101/

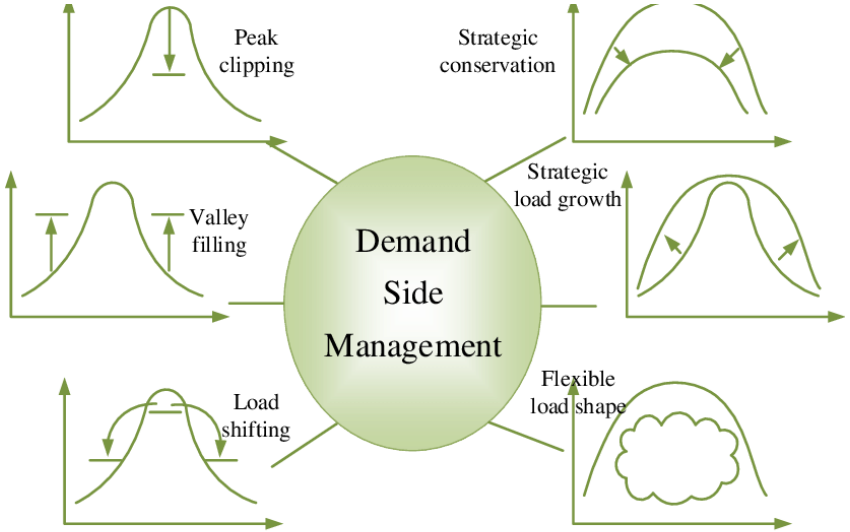
Quelques utilisations du stockage thermique

Quelques fonctions du stockage de chaleur et applications

Réseau de chaleur urbain

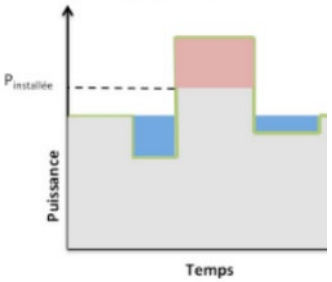


< 180°C

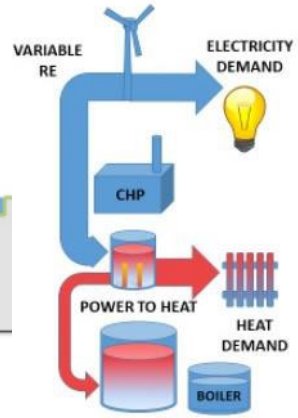


https://energycentral.com/c/gn/how-important-load-shifting-microgrids

Industrie/Réseaux



Lissage et flexibilité



P2H sur surplus élec

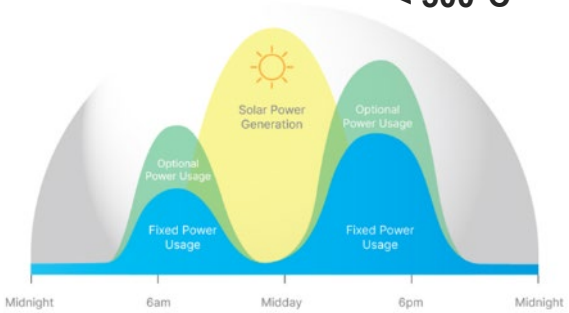
SMR

<500°C



Chaleur solaire

< 500°C



https://www.powerpal.net/blog/load-shifting-101/

200-500°C Batterie de Carnot



https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-long-duration-energy-storage-solution-selected-for-department-of-energy-program-in-alaska

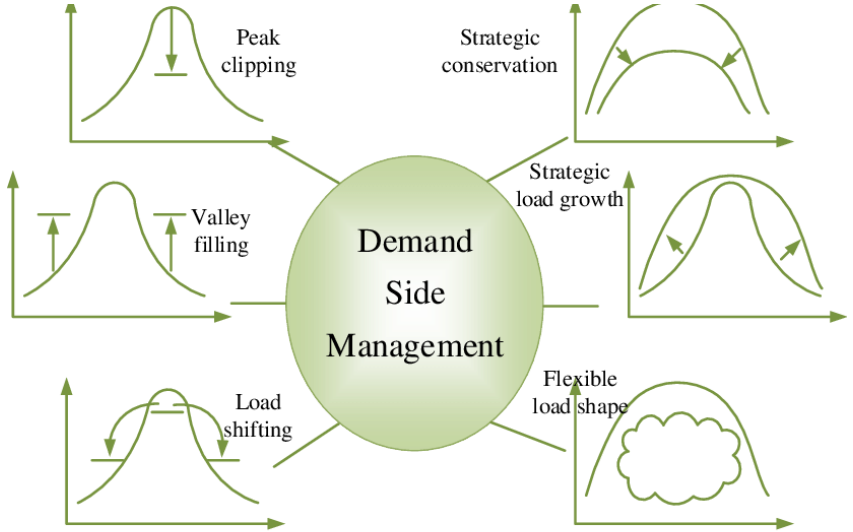
Quelques utilisations du stockage thermique

Quelques fonctions du stockage de chaleur et applications

Réseau de chaleur urbain

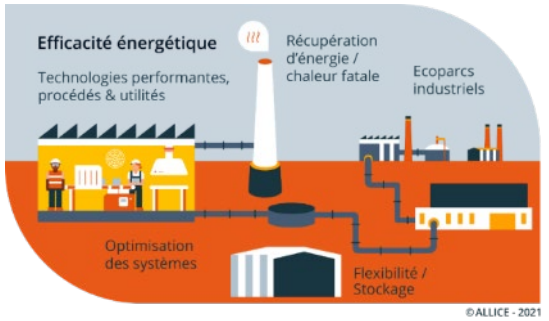


< 180°C



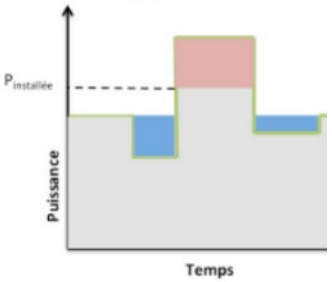
https://energycentral.com/c/gn/how-important-load-shifting-microgrids

Chaleur fatale

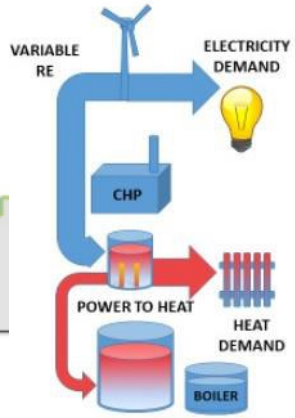


100-1000°C

Industrie/Réseaux



Lissage et flexibilité



P2H sur surplus élec

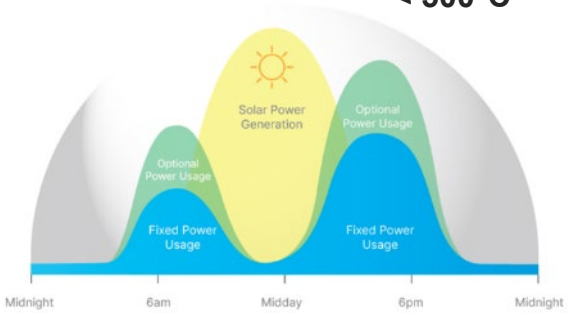
SMR



<500°C

Chaleur solaire

< 500°C



https://www.powerpal.net/blog/load-shifting-101/

200-500°C

Batterie de Carnot



https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-long-duration-energy-storage-solution-selected-for-department-of-energy-program-in-alaska

Technologies de stockage étudiées au CEA

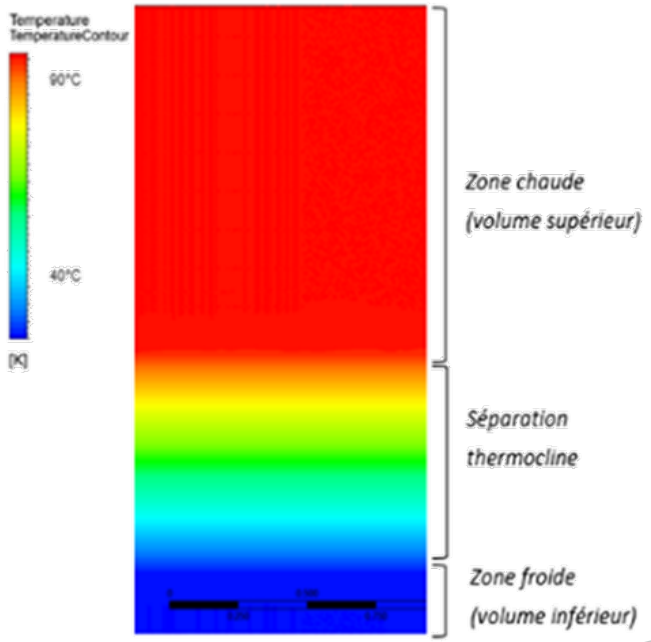
Technologies de stockage étudiées au CEA

Stockage sensible

Principe de fonctionnement :

Stockage de chaleur sensible stratifié en température

Effet thermocline



- ✓ **Densité énergétique de stockage**
  - ✓ Thermocline eau : 15-40 kWh/m^3

Stockage latent

Technologies de stockage étudiées au CEA

Stockage sensible

Stockage latent

Principe de fonctionnement :

Thermocline eau pressurisée à Grenoble



- 3*200 m^3, 180°C
- Lissage de la production de la centrale biomasse (40 MW) + réduction des ON/OFF d'autres sources

✓ **Densité énergétique de stockage**

✓ Thermocline eau : 15-40 kWh/m^3

Technologies de stockage étudiées au CEA

Stockage sensible

Principe de fonctionnement :

Stockage de chaleur sensible stratifié en température

Thermocline eau atmosphérique à Brest



- 1000 m^3, <95°C
- ≈ 2500 MWh/an, ≈ 400 logements
- ↘ 700 Tonnes CO2 sur 20 ans
- Thermocline eau : 15-40 kWh/m

Stockage latent

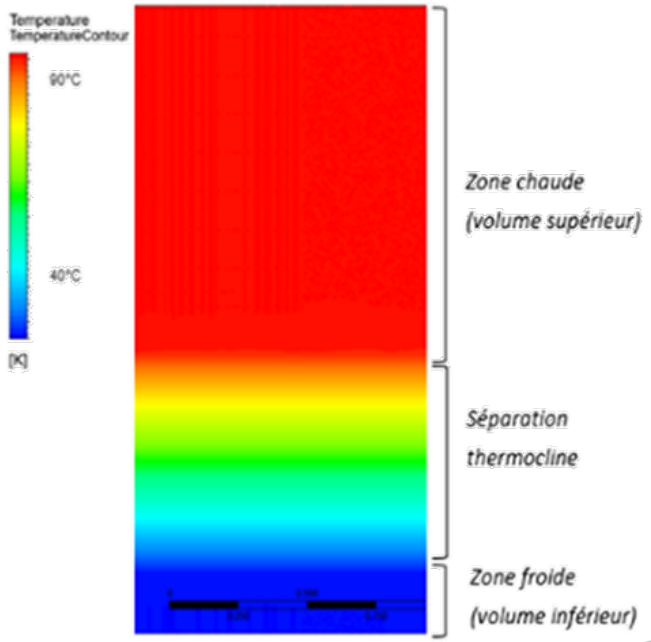
Technologies de stockage étudiées au CEA

Stockage sensible

Principe de fonctionnement :

Stockage de chaleur sensible stratifié en température

Effet thermocline



- ✓ **Densité énergétique de stockage**
  - ✓ Thermocline eau : 15-40 kWh/m^3

Stockage latent

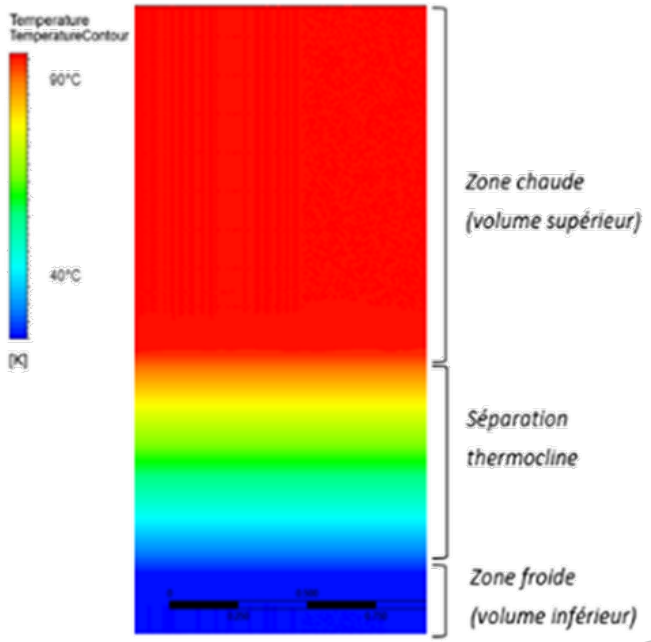
Technologies de stockage étudiées au CEA

Stockage sensible

Principe de fonctionnement :

Stockage de chaleur sensible stratifié en température

Effet thermocline



- ✓ **Densité énergétique de stockage**
  - ✓ Thermocline eau : 15-40 kWh/m^3

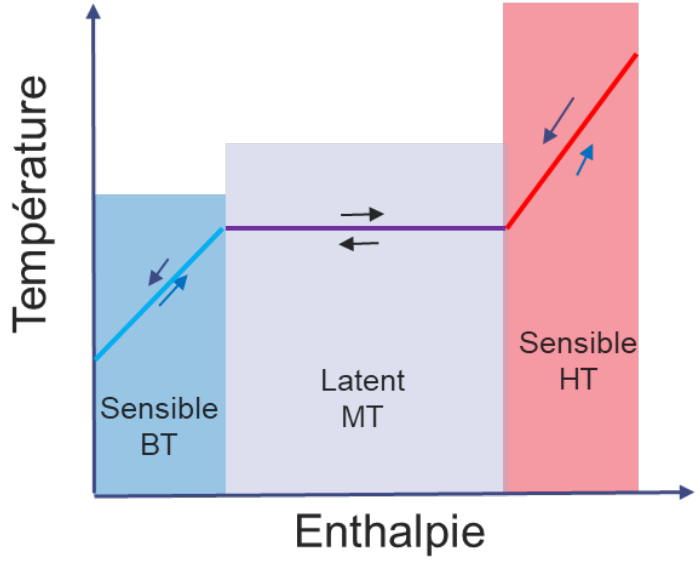
Stockage latent

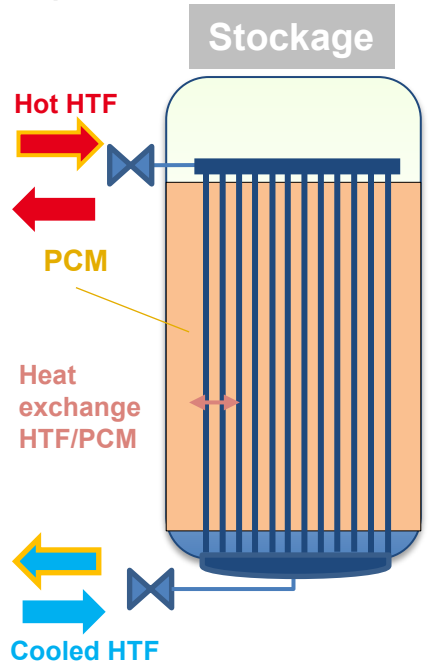
Principe de fonctionnement :

Stockage de chaleur latente

MCP : matériaux à changement de phase

fusion / cristallisation





- ✓ **Densité énergétique de stockage**
  - ✓ Latent : 60-100 kWh/m3

MCP : Adapté pour des faibles ΔT

Choix du matériau: Source chaude > Tf > Source froide

Charge

Décharge

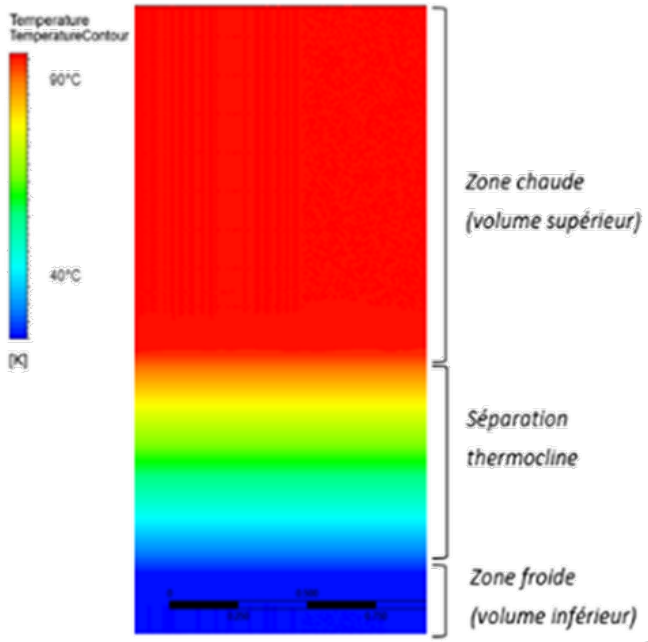
Technologies de stockage étudiées au CEA

Stockage sensible

Principe de fonctionnement :

Stockage de chaleur sensible stratifié en température

Effet thermocline

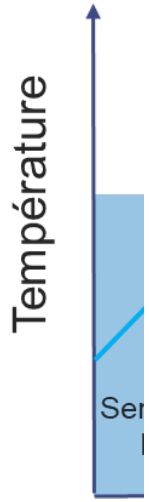


✓ **Densité énergétique de stockage**

✓ Thermocline eau : 15-40 kWh/m³

Stockage latent

Principe de fonctionnement :



✓ **Densi**

✓

MCP : Adapt
Choix du ma

Stockage MCP à Nice





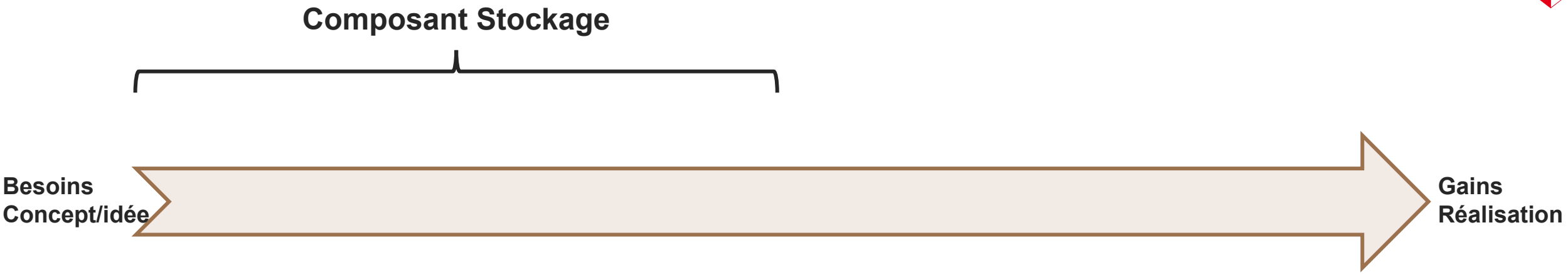
- 1.2 MWh, 600 kW, 13 T de MCP
- Fonctionnement 35/65°C
- Intégré au réseau Nice Méridia (chaud, froid, HP, TES chaud et froid)

Stockage de chaleur et systèmes

Stockage de chaleur et systèmes



Stockage de chaleur et systèmes



Stockage de chaleur et systèmes

Composant Stockage

Composants TES (« manipes »)

Besoins Concept/idée → **Gains Réalisation**

- Echelle labo
- Caractérisation fine
- Performances
- « Science »
- Modèles complets
- TRL≤5
- Etc…



Stockage de chaleur et systèmes

Composant Stockage

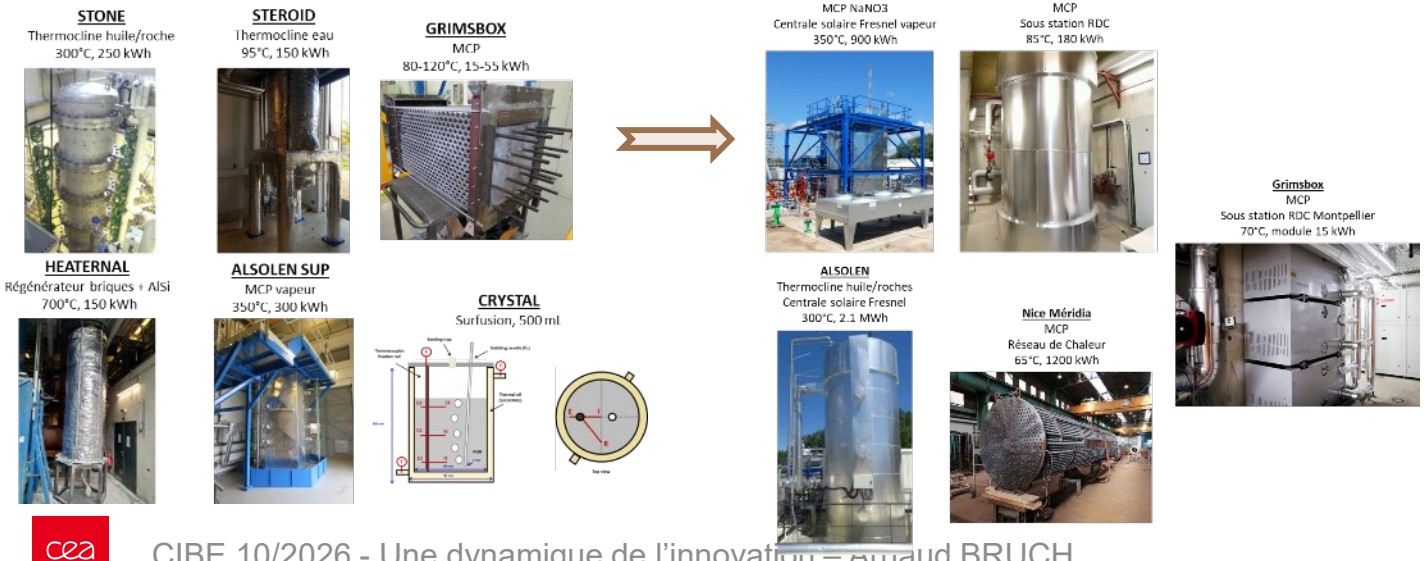
Composants TES (« manipes »)

Prototypes Démonstrateurs

Besoins Concept/idée → **Gains Réalisation**

- Echelle labo
- Caractérisation fine
- Performances
- « Science »
- Modèles complets
- TRL≤5
- Etc…

- Echelle représentative
- Installation sur site
- Fonctionnement « réel »
- Performances sur site
- Contraintes sites
- TRL5→7



Stockage de chaleur et systèmes

Composant Stockage

Composants TES (« manipes »)

- Echelle labo
- Caractérisation fine
- Performances
- « Science »
- Modèles complets
- TRL≤5
- Etc…

Prototypes Démonstrateurs

- Echelle représentative
- Installation sur site
- Fonctionnement « réel »
- Performances sur site
- Contraintes sites
- TRL5→7

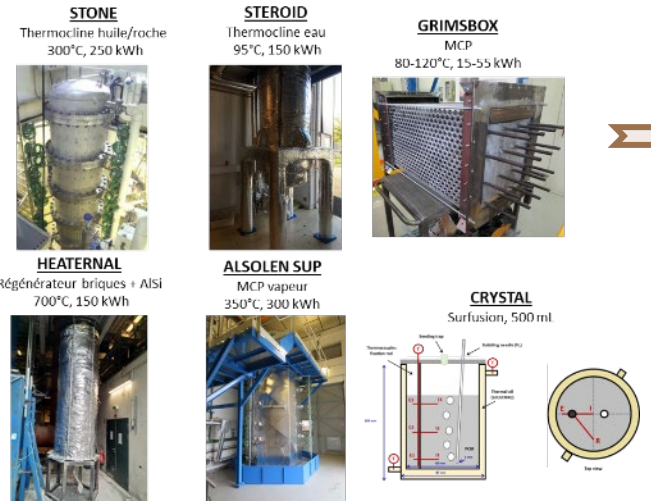
Système complet

Intégration

- Etude multi-sources, multi-consommateurs
- Modèles réduits
- Elargissement au système complet
- Performances globales
- Optimisation multi-pilotage, gains
- Etc…

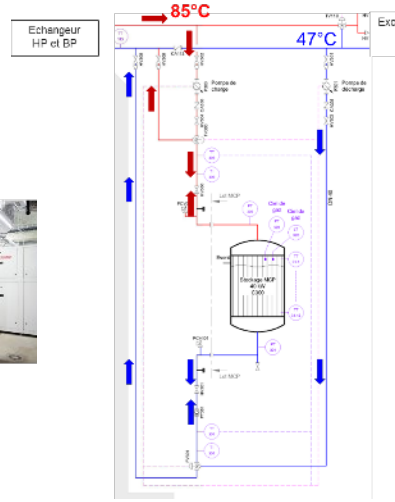
Pilotage Optimisation

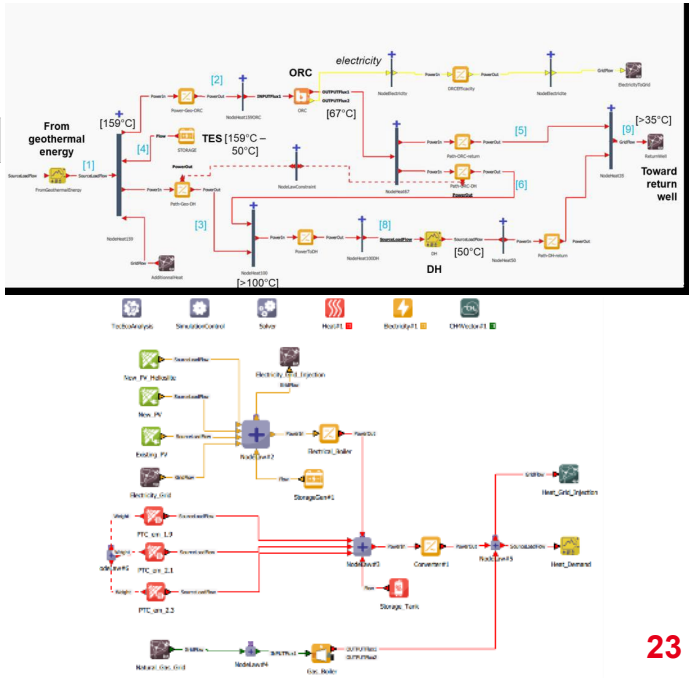
Besoins Concept/idée → **Gains Réalisation**











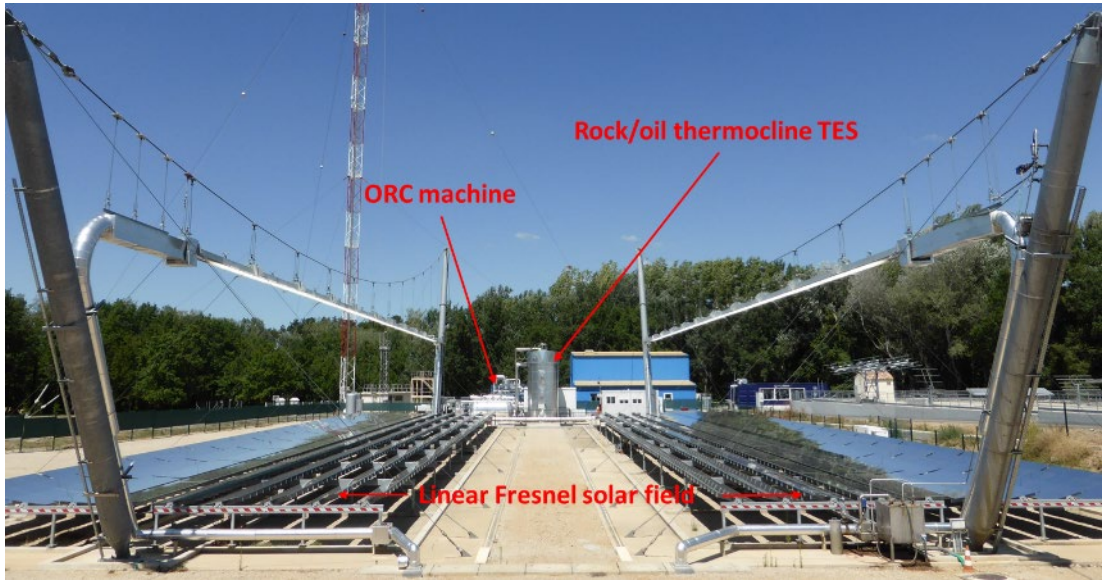
Du composant au système complet

Centrale Fresnel ALSOLEN

Du composant au système complet

Centrale Fresnel ALSOLEN

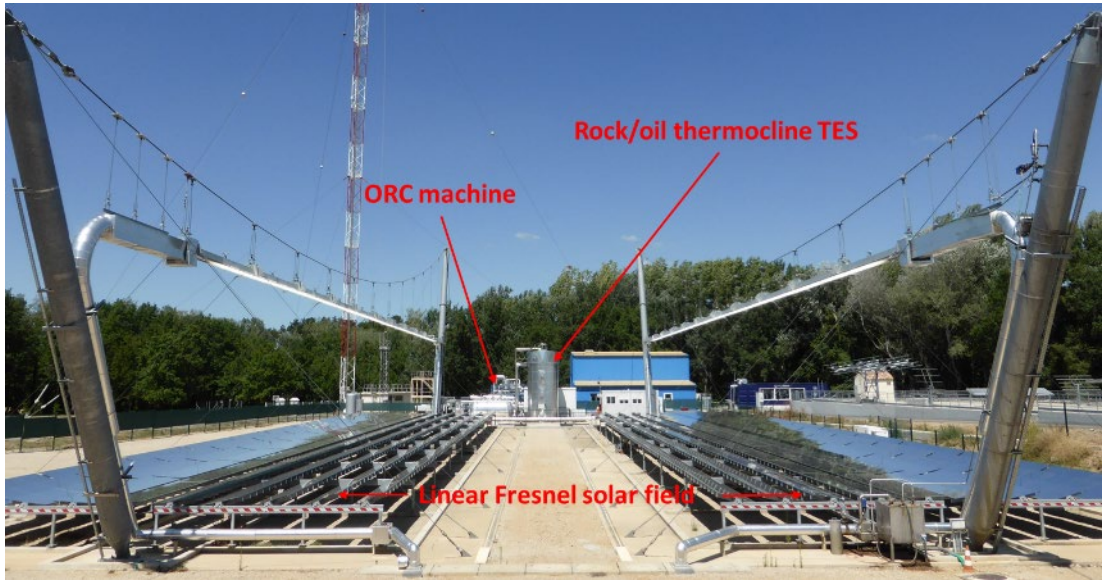
Prototype de centrale Fresnel 500 kWth au CEA Cadarache



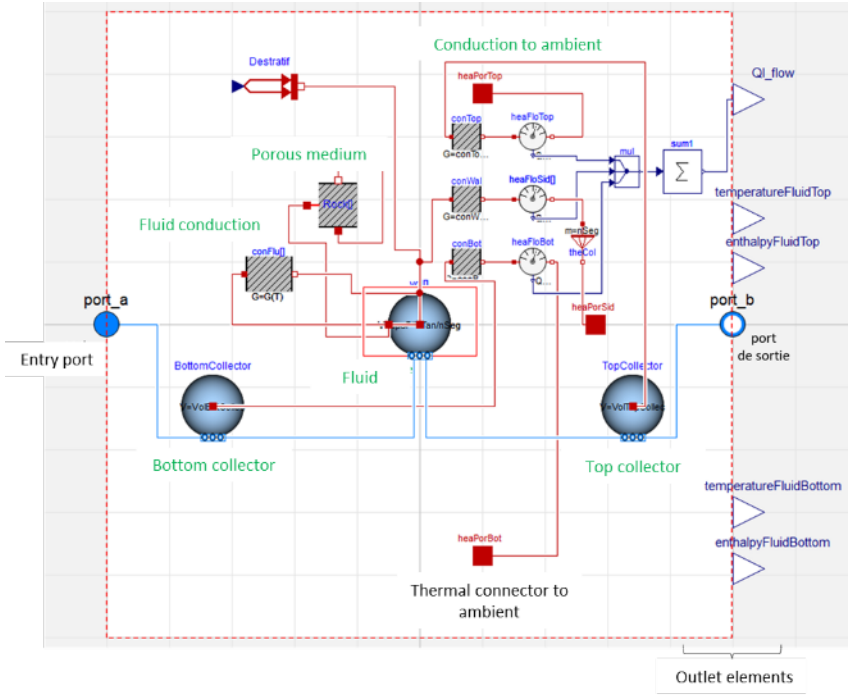
Du composant au système complet

Centrale Fresnel ALSOLEN

Prototype de centrale Fresnel 500 kWth au CEA Cadarache



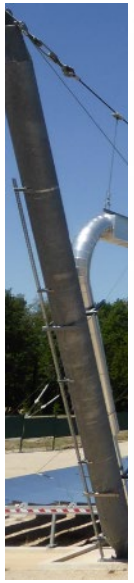
Modèle dynamique sous Dymola

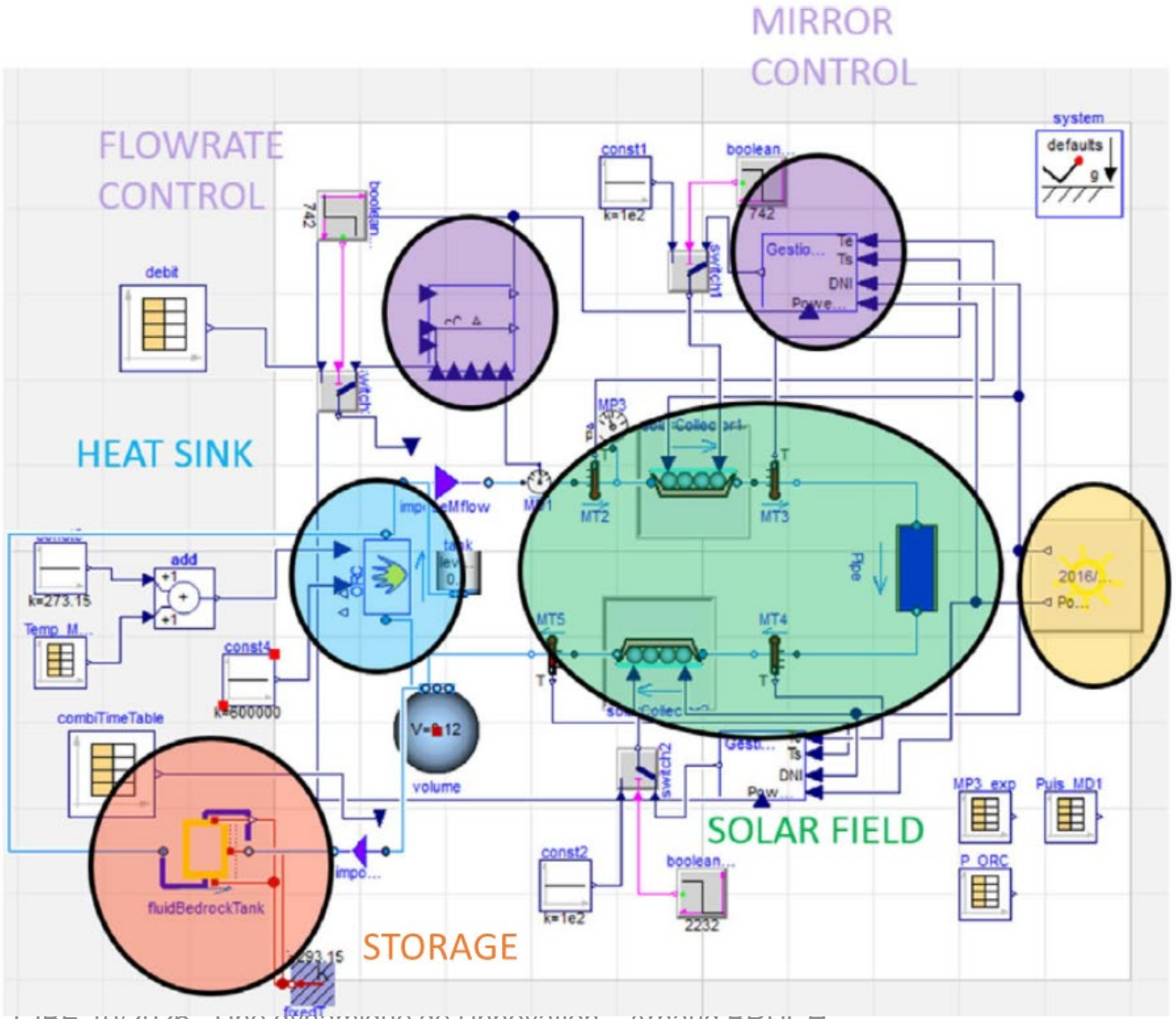


Du composant au système complet

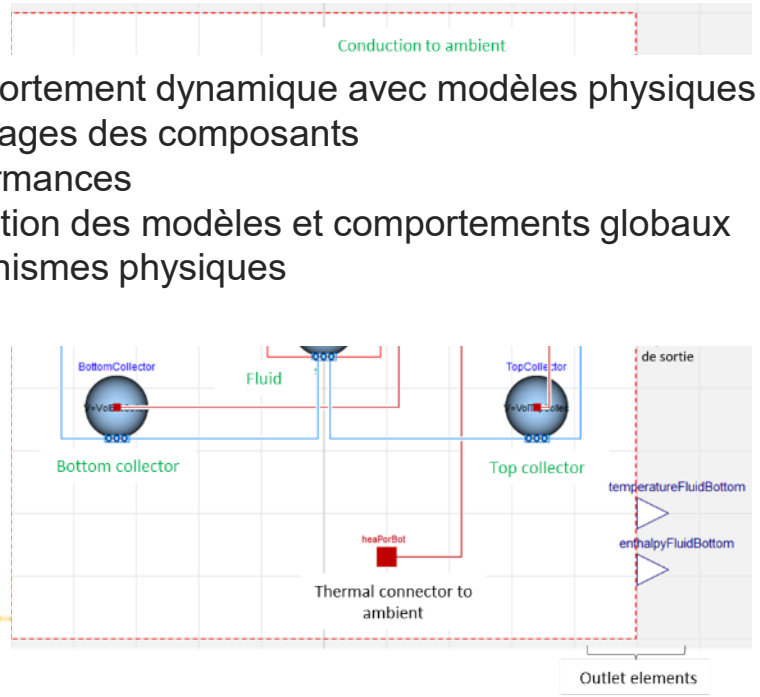
Centrale Fresnel ALSOLEN

Prototype de centrale Fresnel 500 kWth au CEA Cadarache





Modèle dynamique sous Dymola

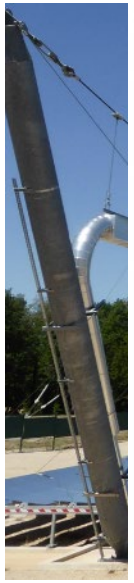


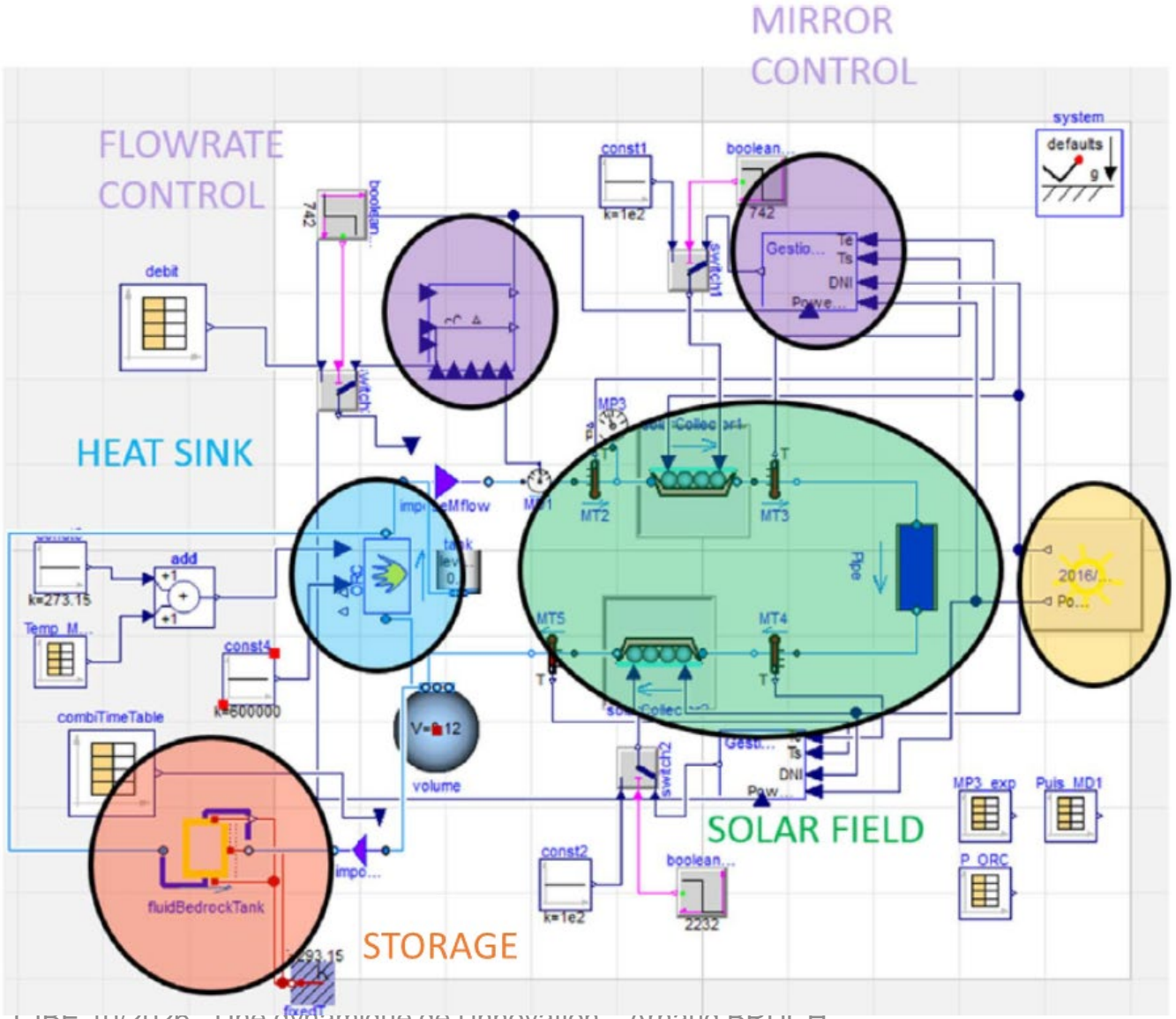
- Comportement dynamique avec modèles physiques
- Couplages des composants
- Performances
- Validation des modèles et comportements globaux
- Mécanismes physiques
- …

Du composant au système complet

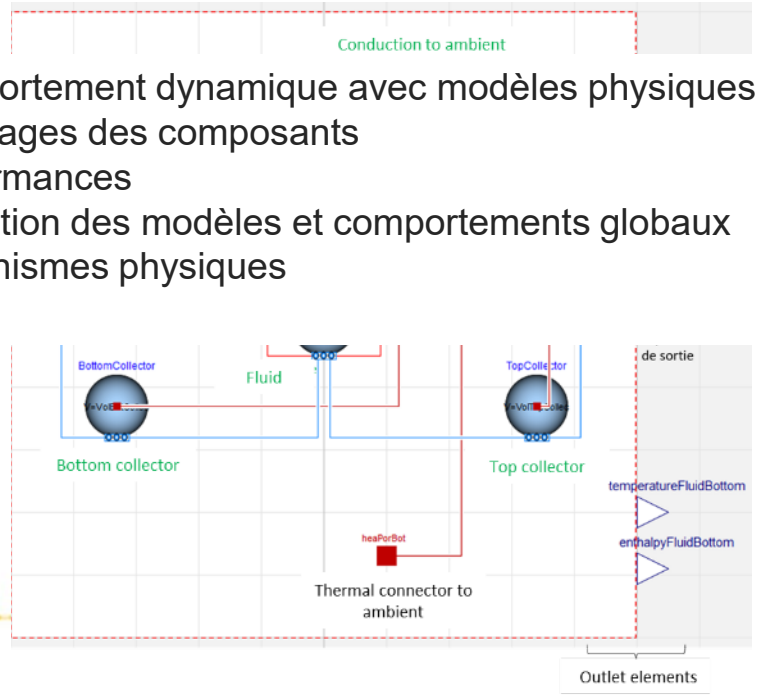
Centrale Fresnel ALSOLEN

Prototype de centrale Fresnel 500 kWth au CEA Cadarache





Modèle dynamique sous Dymola



- Comportement dynamique avec modèles physiques
- Couplages des composants
- Performances
- Validation des modèles et comportements globaux
- Mécanismes physiques
- …

Gains

- Validation des modèles en conditions réelles
- Optimisation du pilotage
- Optimisation du productible
- Développement de protocoles optimisés (démarrage, gestion transitoires etc…)

Du composant au système complet

Congestion hydraulique d'un RDC urbain

Du composant au système complet

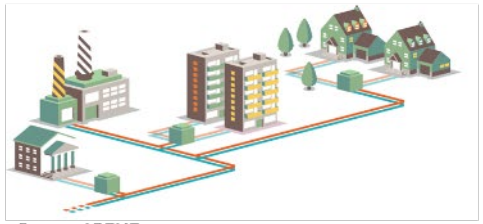
Congestion hydraulique d'un RDC urbain

Décarboner la chaleur

Réseaux de chaleur
- ✓ efficace
- ✓ rentable

↘ CO_2

Diminution de la température d'opération
- \+ chaleur renouvelable
- \+ chaleur de récupération
- \- énergie primaire consommée en production
- \- pertes thermiques en distribution



Source : ADEME

à demande égale,

$$Q = \dot{m}\, c_p\, (T_{aller} - T_{retour})$$

Augmentation du débit de distribution

Risque de congestion hydraulique

Du composant au système complet

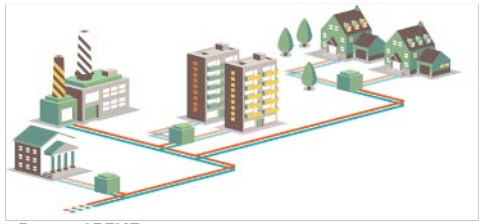
Congestion hydraulique d'un RDC urbain

Décarboner la chaleur

Réseaux de chaleur
- ✓ efficace
- ✓ rentable

→ ↘ CO_2

Diminution de la température d'opération
- \+ chaleur renouvelable
- \+ chaleur de récupération
- \- énergie primaire consommée en production
- \- pertes thermiques en distribution



Source : ADEME

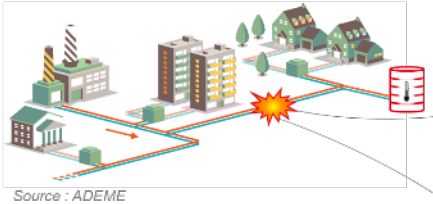
↓ à demande égale, $Q = \dot{m}\, c_p\, (T_{aller} - T_{retour})$

Augmentation du débit de distribution

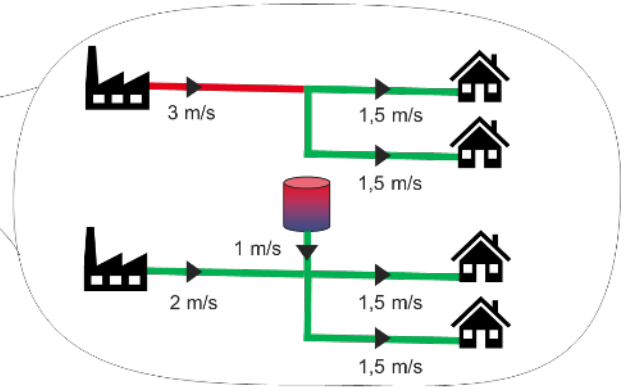
Risque de congestion hydraulique

Eviter la congestion hydraulique dans les réseaux de chaleur

les stockages distribués



Source : ADEME



Du composant au système complet

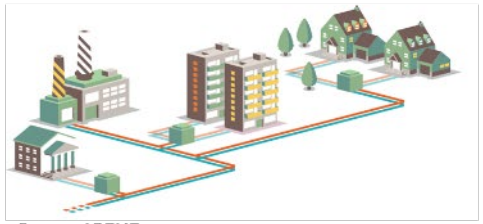
Congestion hydraulique d'un RDC urbain

Décarboner la chaleur

Réseaux de chaleur
- ✓ efficace
- ✓ rentable

↘ CO_2

Diminution de la température d'opération
- \+ chaleur renouvelable
- \+ chaleur de récupération
- \- énergie primaire consommée en production
- \- pertes thermiques en distribution



Source : ADEME

à demande égale,

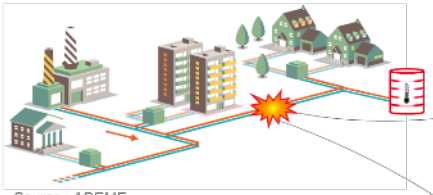
$Q = \dot{m}\, c_p\, (T_{aller} - T_{retour})$

Augmentation du débit de distribution

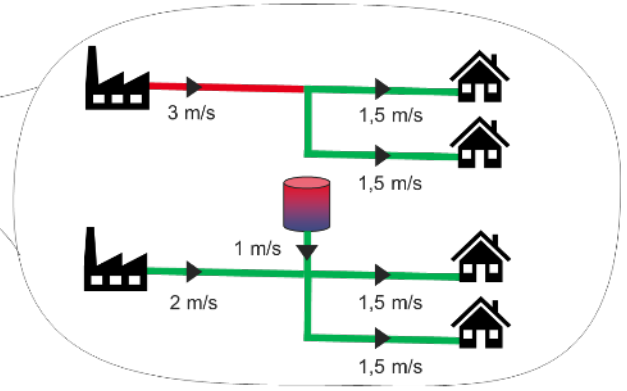
Risque de congestion hydraulique

Eviter la congestion hydraulique dans les réseaux de chaleur

les stockages distribués

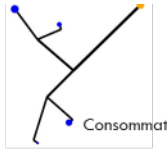


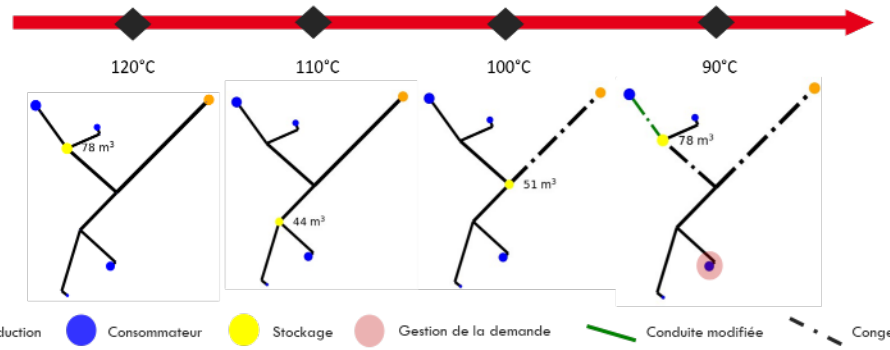
Source : ADEME



Etude à petite échelle

3 options de mise à niveau:
- Remplacement de conduites
- Ajout de stockages distribués
- Gestion de la demande d'un consommateur





Du composant au système complet

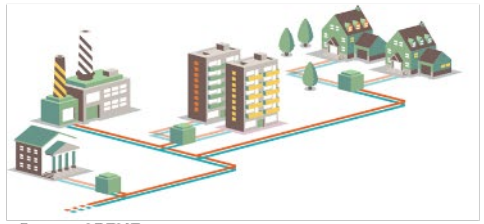
Congestion hydraulique d'un RDC urbain

Décarboner la chaleur

Réseaux de chaleur
- ✓ efficace
- ✓ rentable

↘ CO_2

Diminution de la température d'opération
- \+ chaleur renouvelable
- \+ chaleur de récupération
- \- énergie primaire consommée en production
- \- pertes thermiques en distribution



Source : ADEME

à demande égale,

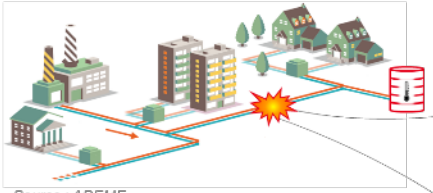
$Q = \dot{m}\, c_p\, (T_{aller} - T_{retour})$

Augmentation du débit de distribution

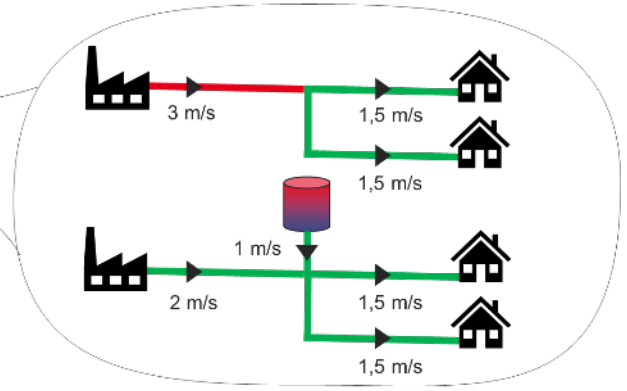
Risque de congestion hydraulique

Eviter la congestion hydraulique dans les réseaux de chaleur

les stockages distribués

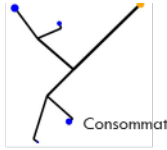


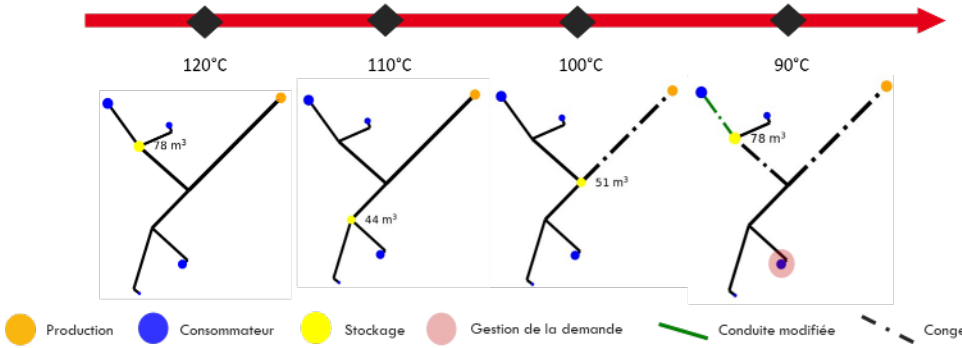
Source : ADEME



Etude à petite échelle

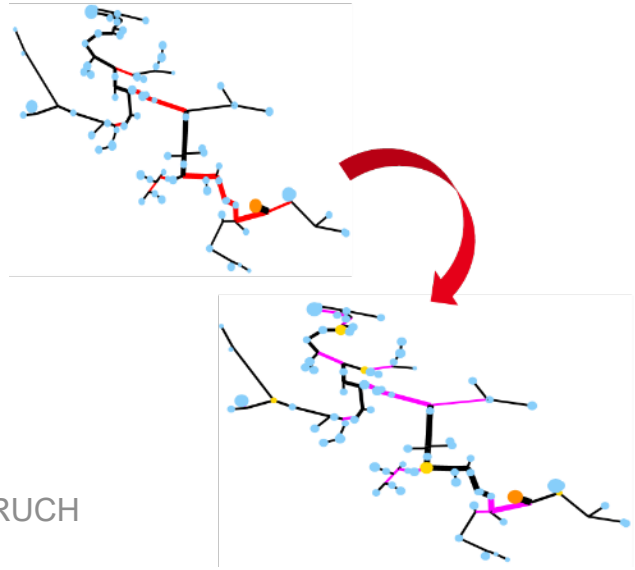
3 options de mise à niveau:
- Remplacement de conduites
- Ajout de stockages distribués
- Gestion de la demande d'un consommateur

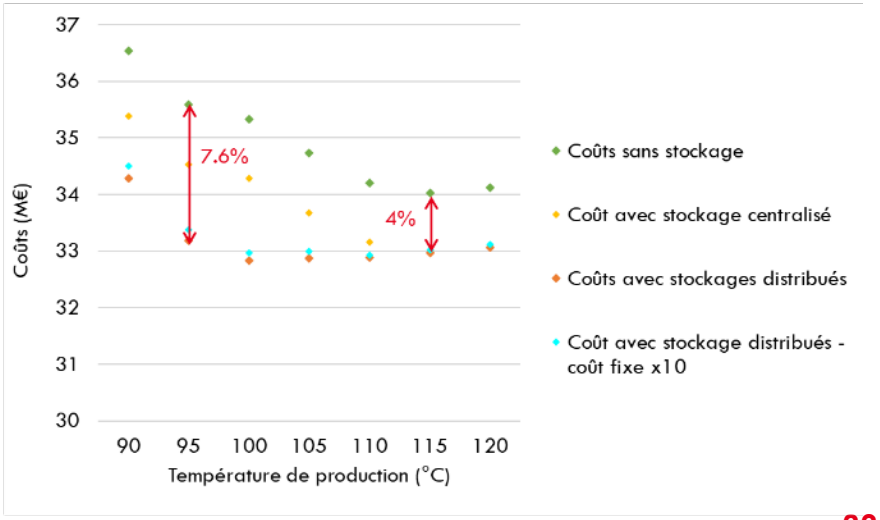




Etude à grande échelle

80 consommateurs – 120°C ⇨ 90°C – 4 jours représentatifs – 20 ans



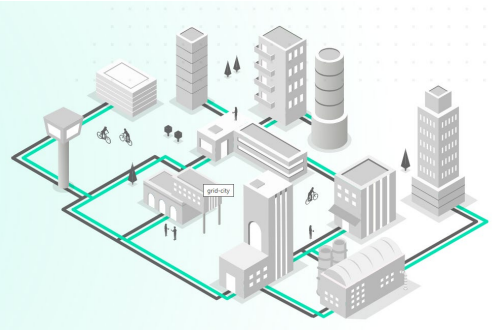


Du composant au système complet

Jumeau numérique

DistrictLab

https://www.districtlab.eu/



Du composant au système complet

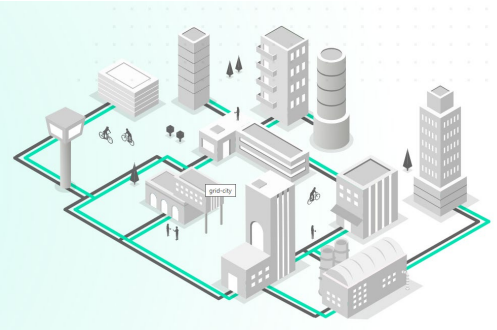
Jumeau numérique

DistrictLab
https://www.districtlab.eu/

Un **jumeau numérique** est la **réplique virtuelle et dynamique** d'un réseau de chaleur. Il simule, anticipe et optimise son fonctionnement en miroir du réseau physique.

Un jumeau numérique est en quelque sorte l'aboutissement de la simulation dynamique et physique d'un process et, notamment,

- "tourne" en parallèle du fonctionnement normal d'un RDC (ou d'autres systèmes et process complexes)
- permet d'envisage/orienter son operation
- permet d'envisager des pilotages complexes, au delà des lois experts et du "bon sens/expertise de l'opérateur", notamment en cas de multi-sources et multi-consommateurs



Du composant au système complet

Jumeau numérique

DistrictLab
https://www.districtlab.eu/

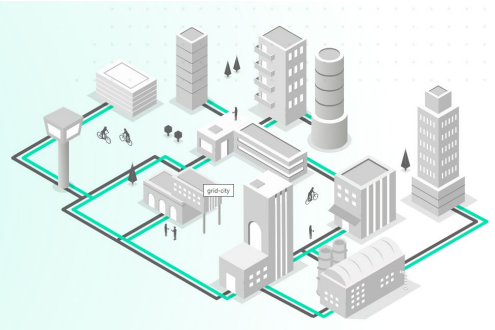
Un **jumeau numérique** est la **réplique virtuelle et dynamique** d'un réseau de chaleur. Il simule, anticipe et optimise son fonctionnement en miroir du réseau physique.

Un jumeau numérique est en quelque sorte l'aboutissement de la simulation dynamique et physique d'un process et, notamment,

- "tourne" en parallèle du fonctionnement normal d'un RDC (ou d'autres systèmes et process complexes)
- permet d'envisage/orienter son operation
- permet d'envisager des pilotages complexes, au delà des lois experts et du "bon sens/expertise de l'opérateur", notamment en cas de multi-sources et multi-consommateurs

Ce qu'il réunit:

- **Un modèle physique**: topologie du réseau, caractéristiques hydrauliques et thermiques des tuyaux, des sous-stations, des générateurs et des moyens de stockage
- **Un modèle du contrôle**: principales boucles de contrôle et stratégie d'opération
- **Un moteur de simulation** : calculs thermiques et hydrauliques (état du réseau, pertes, équilibrage)



Du composant au système complet

Jumeau numérique

DistrictLab

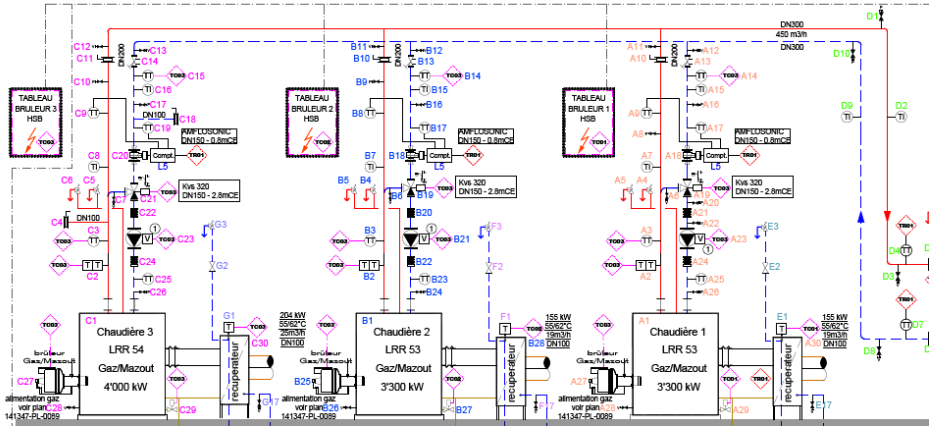
https://www.districtlab.eu/

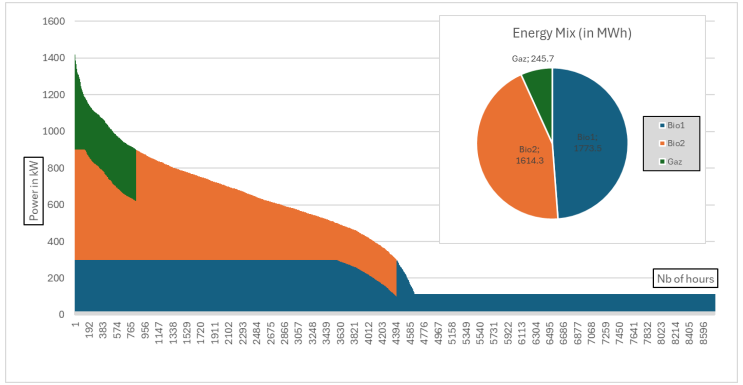
Du composant au système complet

Jumeau numérique

DistrictLab
https://www.districtlab.eu/

Calcul d'un mix de production



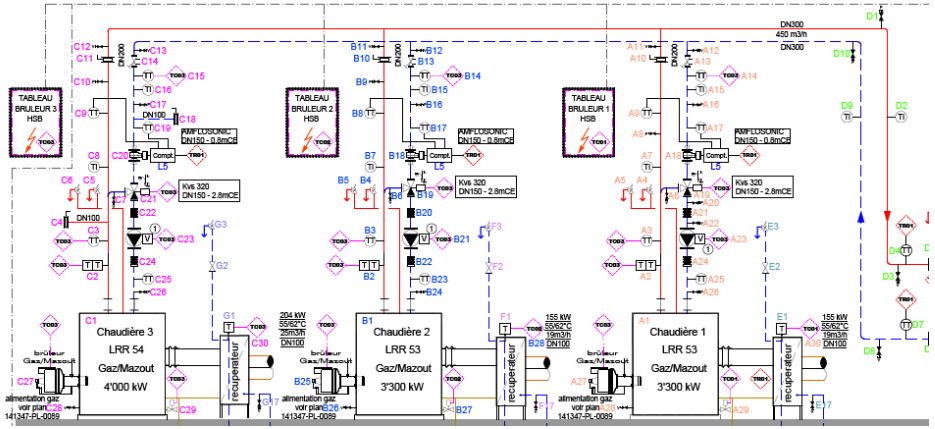


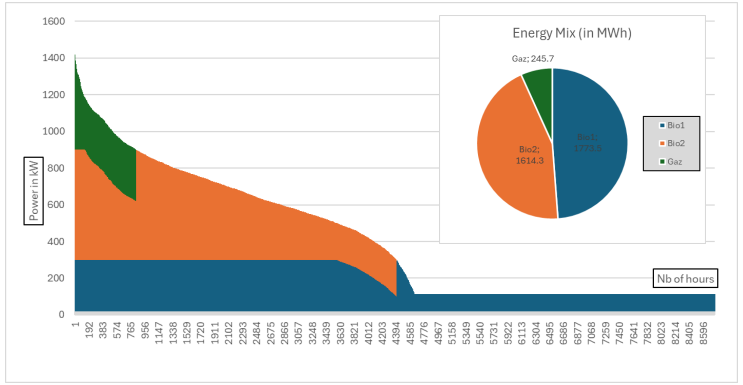
Du composant au système complet

Jumeau numérique

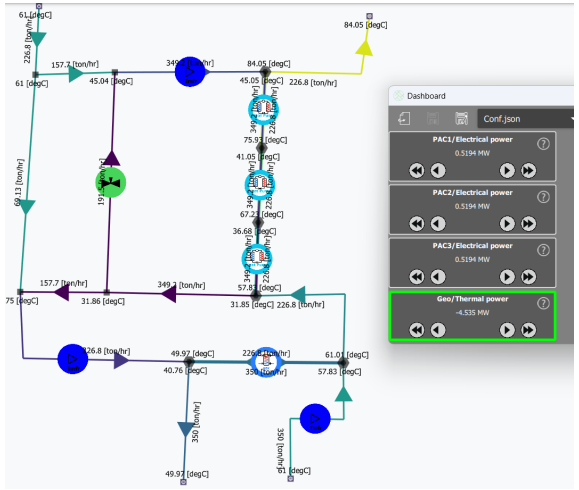
DistrictLab
https://www.districtlab.eu/

Calcul d'un mix de production





Etude de l'architecture d'une centrale



Intégration multi-énergies:

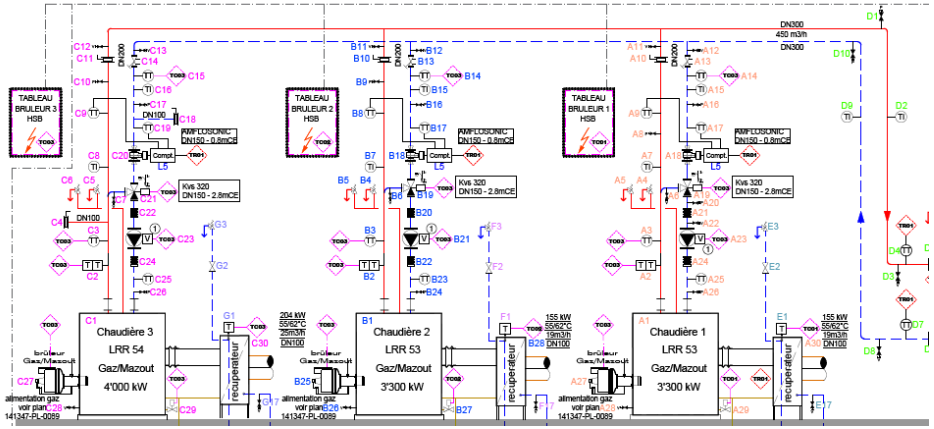
- Géothermie (via pompe à chaleur)
- Biomasse,
- Gaz,
- Stockage

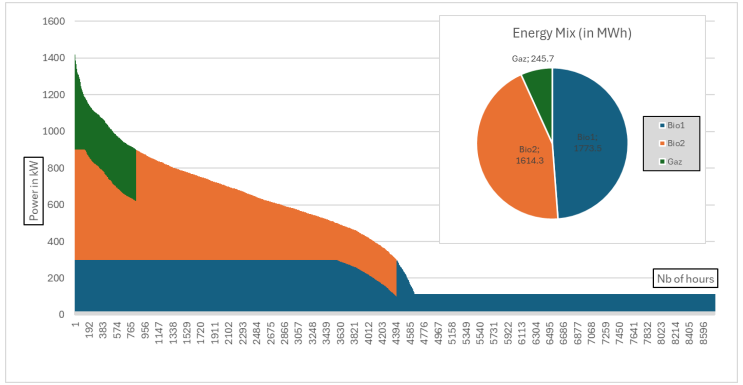
Du composant au système complet

Jumeau numérique

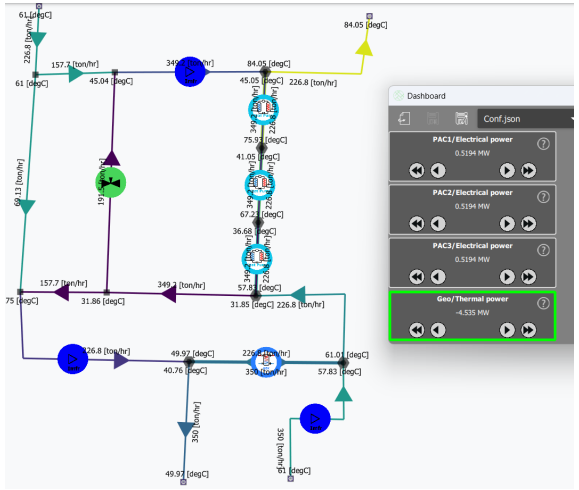
DistrictLab
https://www.districtlab.eu/

Calcul d'un mix de production





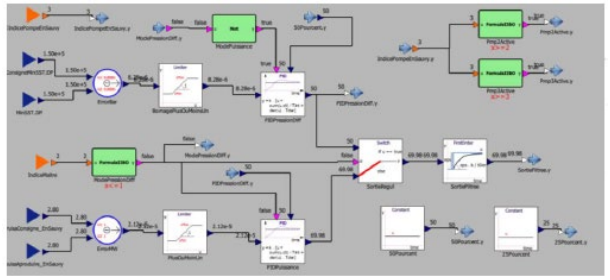
Etude de l'architecture d'une centrale



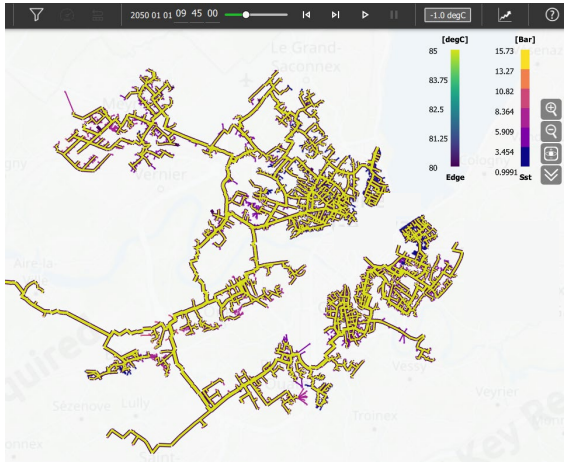
Intégration multi-énergies:

- Géothermie (via pompe à chaleur)
- Biomasse,
- Gaz,
- Stockage

Etude réseau multi-producteurs



- Faisabilité thermohydraulique (intégration EnR)
- Développement du contrôle-commande en environnement virtuel



Du composant au système complet

Jumeau numérique - DistricLab

DistrictLab

https://www.districtlab.eu/

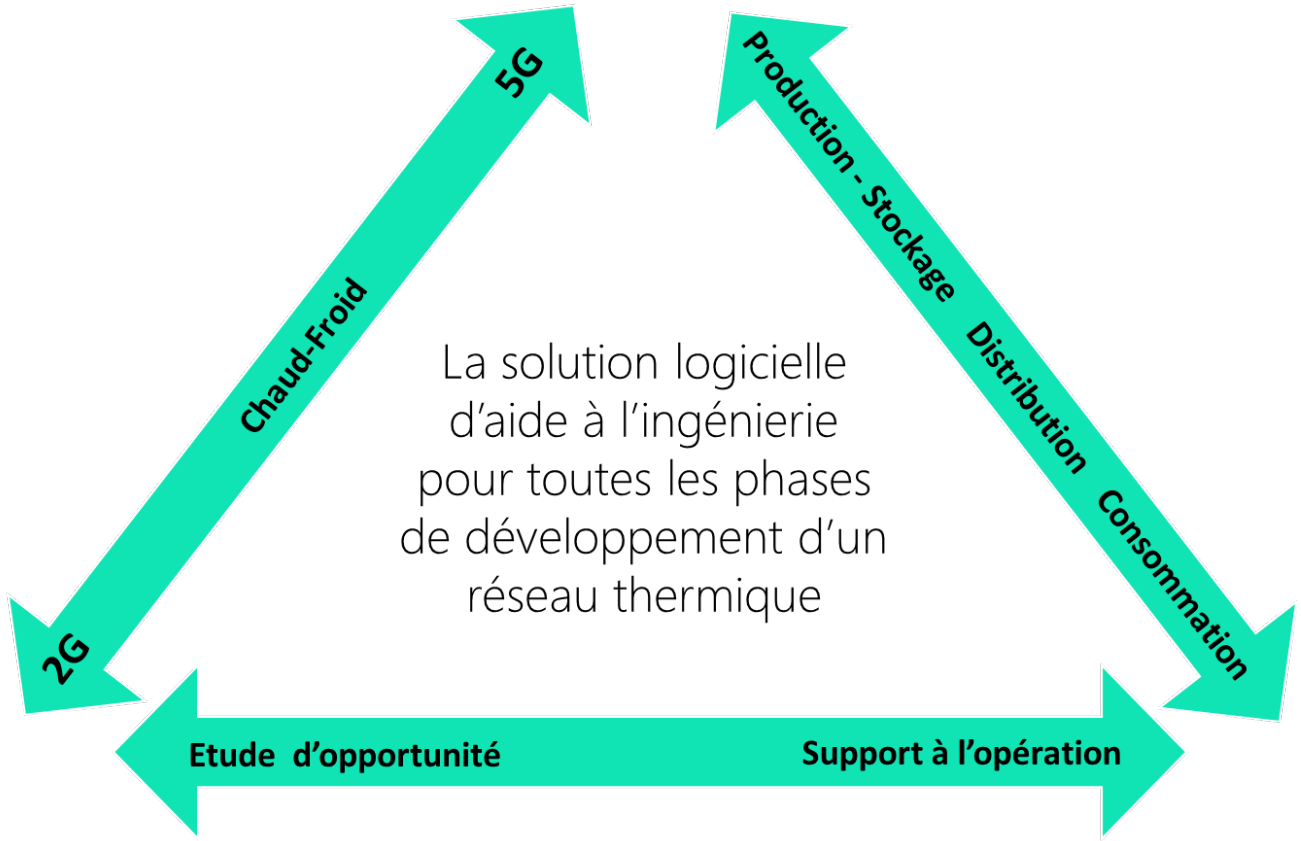
Du composant au système complet

Jumeau numérique – DistricLab

https://www.districtlab.eu/

DistrictLab-H Simulation Studio

Un produit basé sur 30 h.ans de R&D entièrement réalisés au CEA

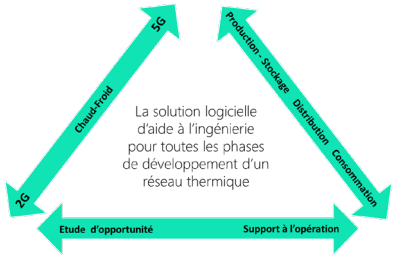


Du composant au système complet

Jumeau numérique - DistricLab

DistrictLab-H Simulation Studio

Un produit basé sur 30 h.ans de R&D entièrement réalisés au CEA



DistrictLab

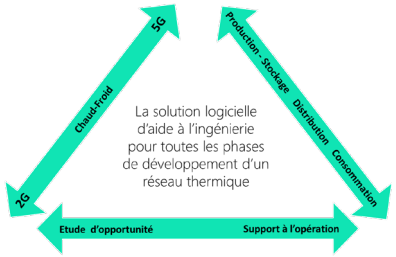
https://www.districtlab.eu/

Du composant au système complet

Jumeau numérique - DistricLab

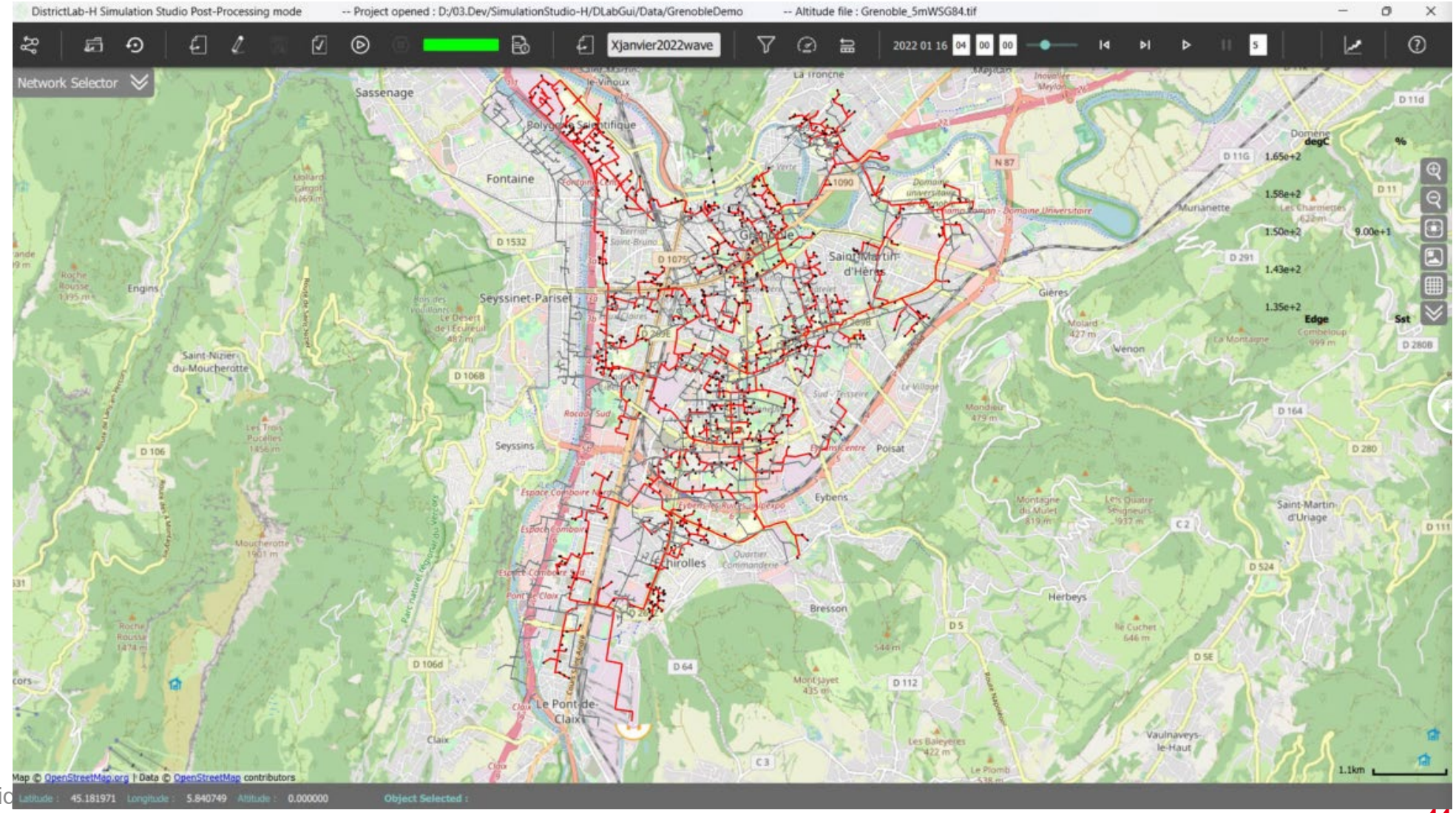
DistrictLab-H Simulation Studio

Un produit basé sur 30 h.ans de R&D entièrement réalisés au CEA



DistrictLab

https://www.districtlab.eu/

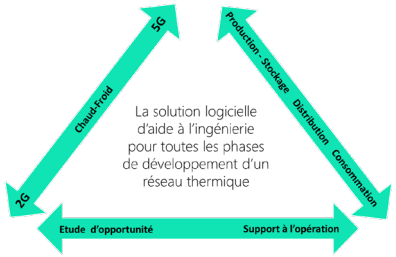


Du composant au système complet

Jumeau numérique - DistricLab

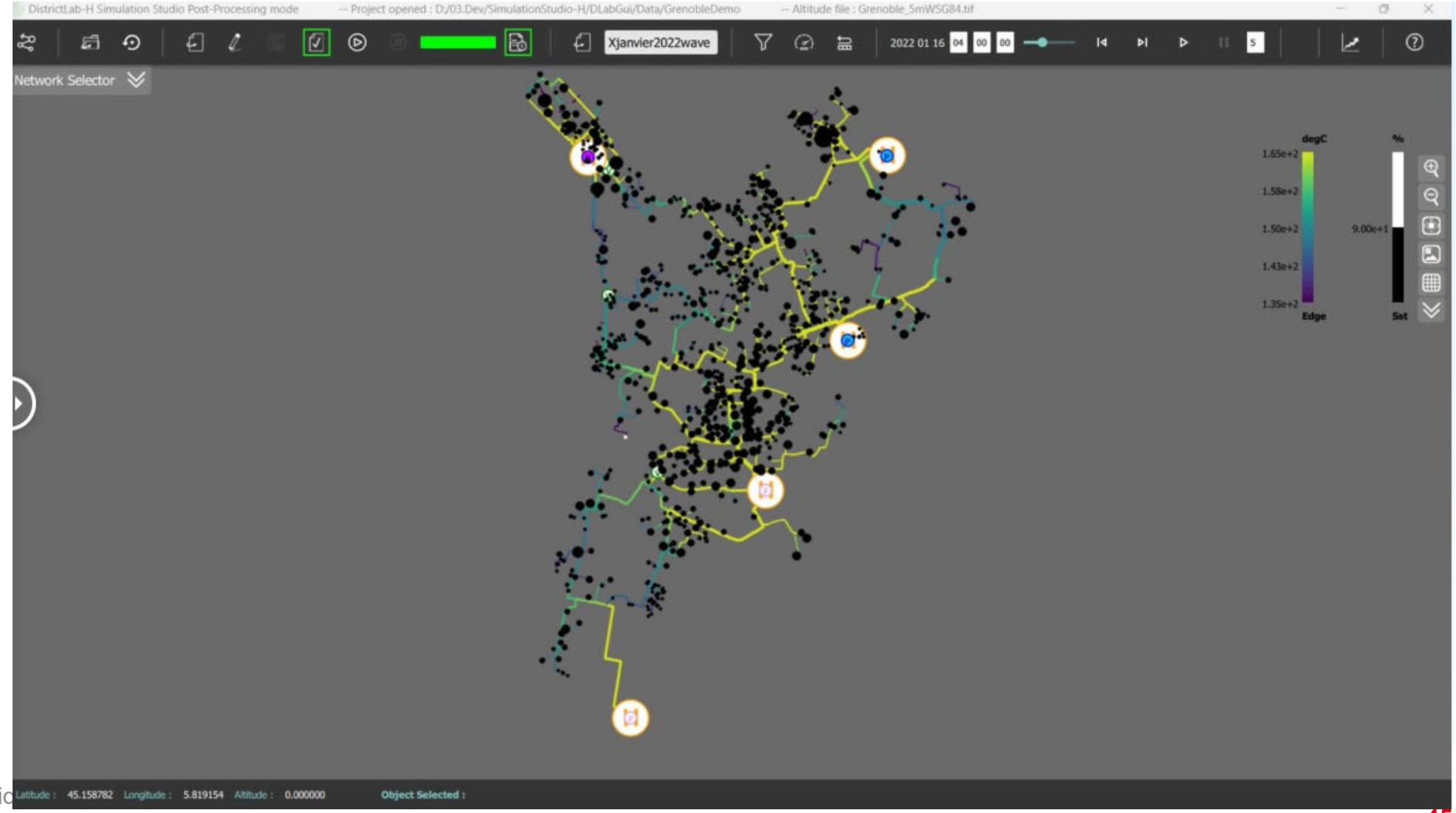
DistrictLab-H Simulation Studio

Un produit basé sur 30 h.ans de R&D entièrement réalisés au CEA



DistrictLab

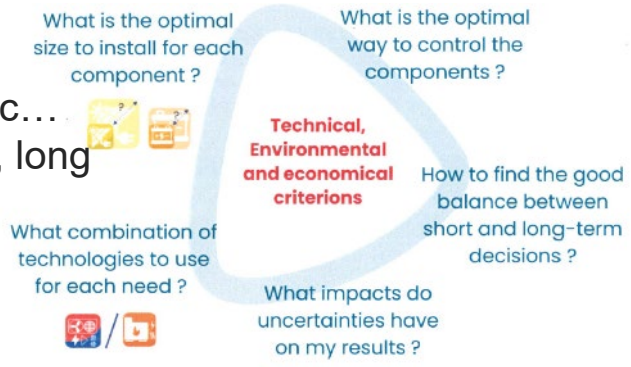
https://www.districtlab.eu/



Simulation des systèmes complets

CAIRN Open by cea

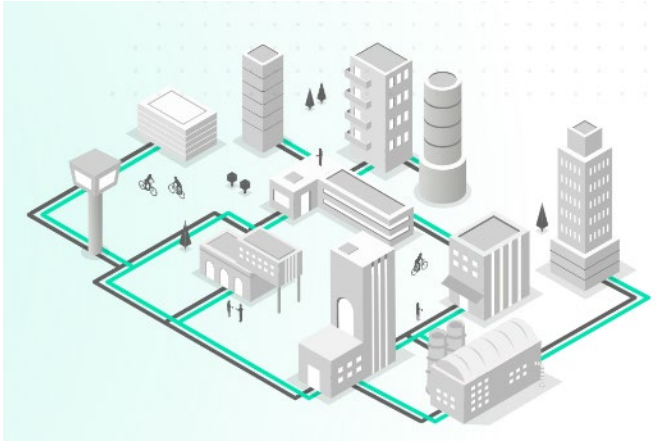
- **Outil open** source du CEA
- **Multi-source**, **multi-consommateur**, **multi-applications**, **multi-vecteurs** etc…
- Optimisation du dimensionnement, du pilotage, du productible (court, moyen, long terme), de la hiérarchisation des sources/consommateurs etc…
- **Optimisation sur CAPEX, OPEX, productible, CO2, eau** etc…
- Moins dédié que DistricLab et plus vaste en terme d'applications/sorties
- **Plus adapté optimisation que jumeau numérique**
- Support, étude dédiée, partenariat, projet commun



DistrictLab

https://www.districtlab.eu/

- **Programme payant**, start-up issue du CEA
- Solution logicielle de réseau de chaleur (**RDC**)
- **Optimisation de la conception et de l'exploitation**
- **Jumeau numérique**
- Support, étude dédiée, expérience client

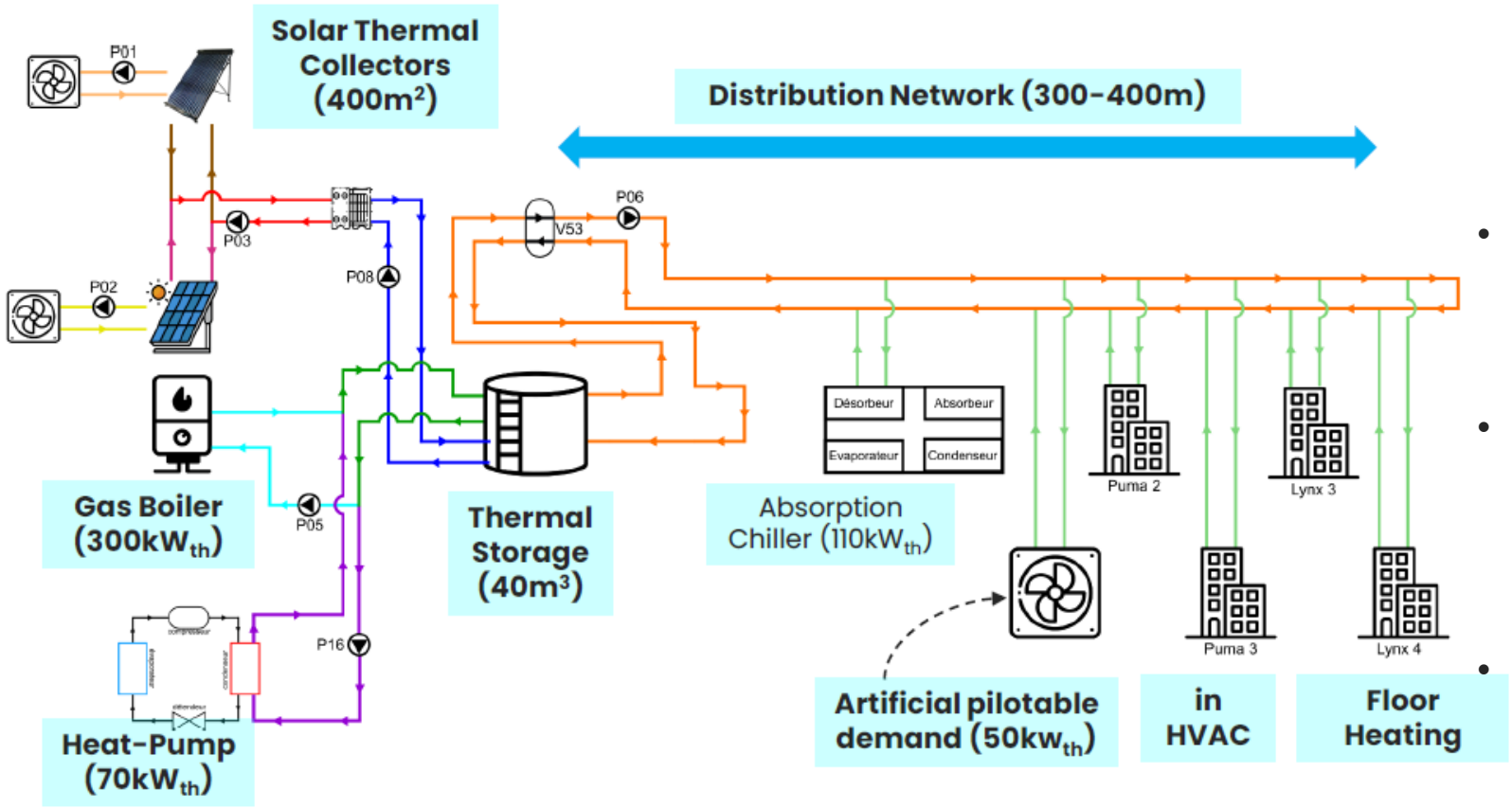


Merci

CEA GRENOBLE
38054 Grenoble Cedex 9
France
Arnaud.bruch@cea.fr
Mob : 06 89 56 52 23
Fixe : 04 38 78 29 14

Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

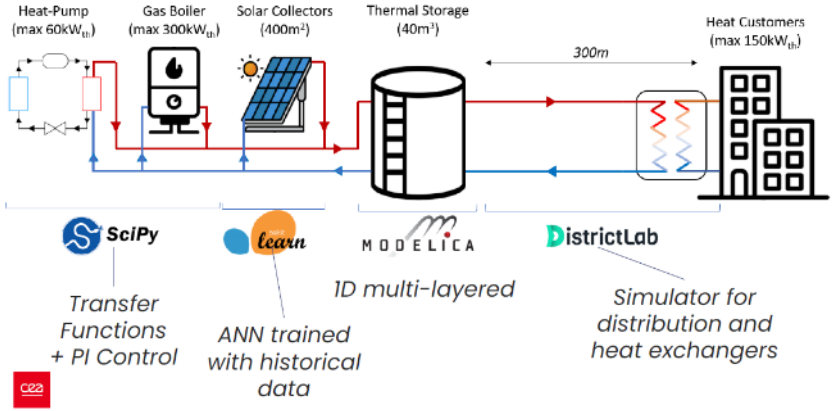
Réseau de chaleur CALORIE du CEA INES



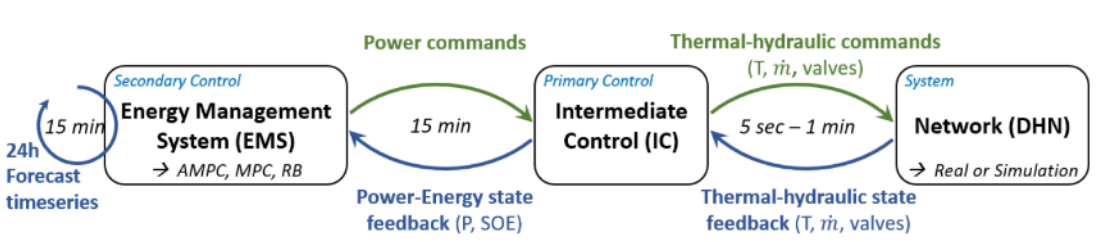
- Petit réseau de chaleur « de recherche »
- Etude d'intégration/pilotage de nouveaux composants, multi-sources, multi-consommateurs etc…
- Optimisation multi-critères (techniques, environnementaux, CAPEX/OPEX etc…)

Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

Modélisation, entrainement … modèle global

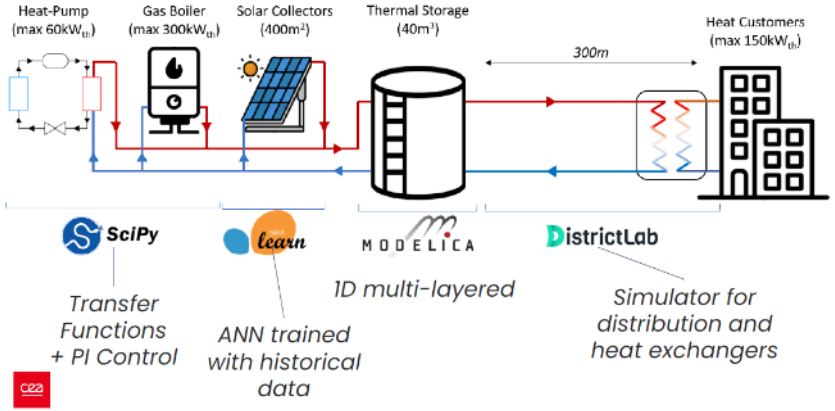


EMS et pilotage

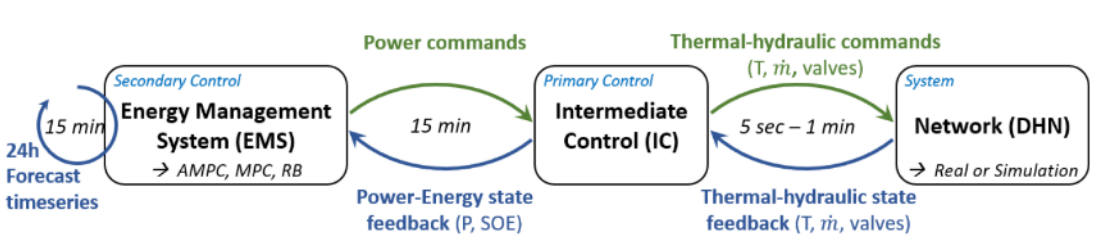


Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

Modélisation, entrainement … modèle global



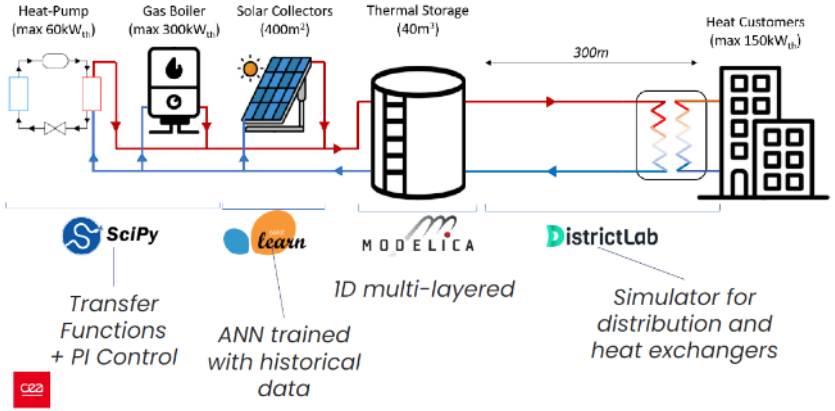
EMS et pilotage



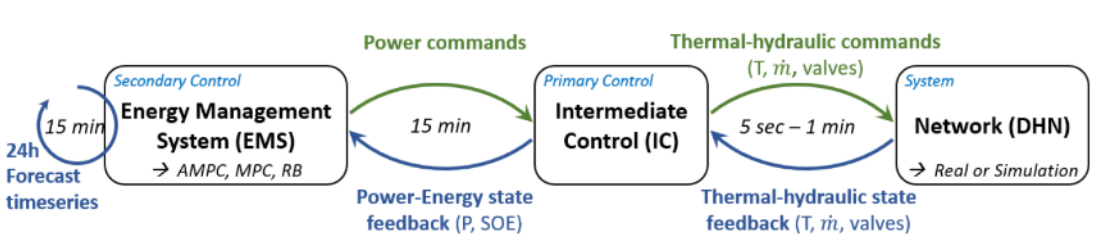


Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

Modélisation, entrainement … modèle global



EMS et pilotage



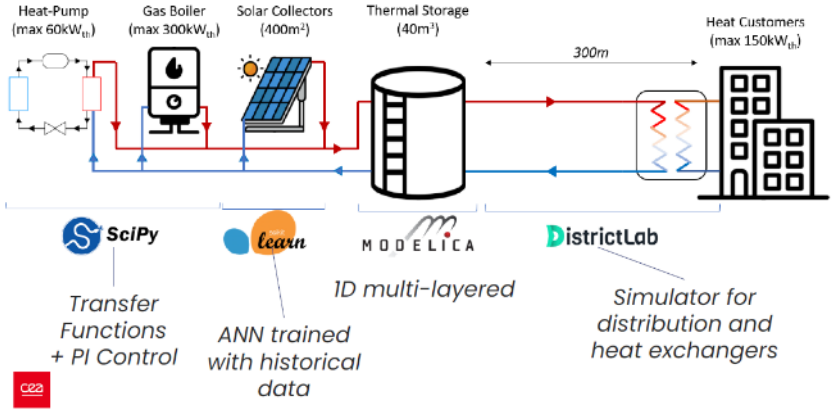
- Binary **State** ON/OFF for HP & GB
- Production **Power** for HP & GB
- State of Energy (**SOE**) storage

$\boldsymbol{x}$

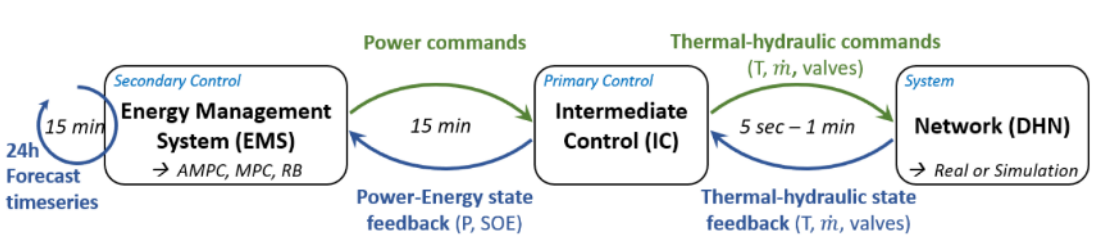


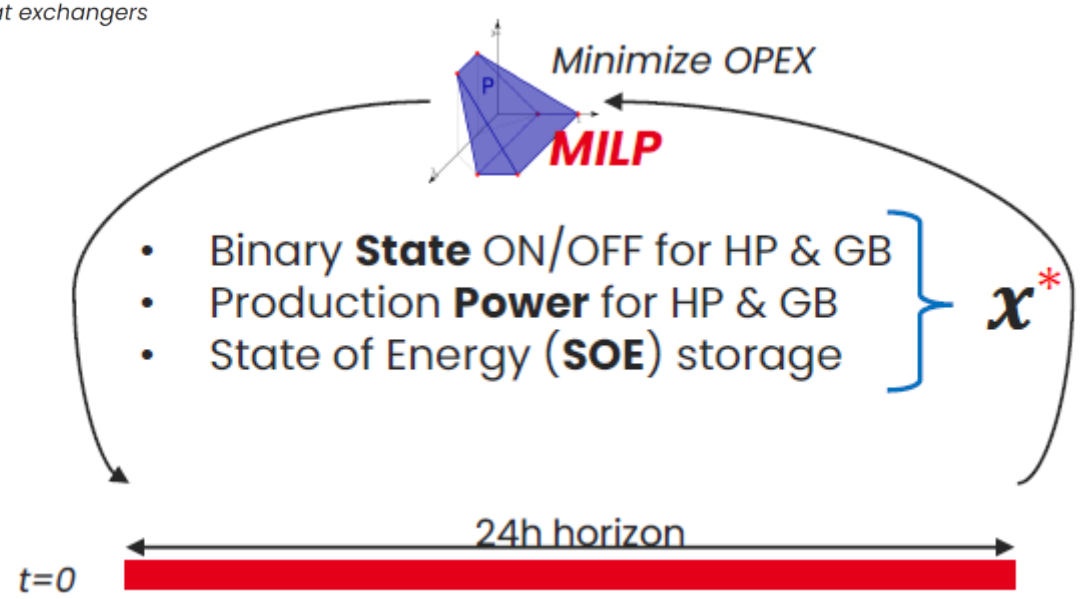
Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

Modélisation, entrainement … modèle global



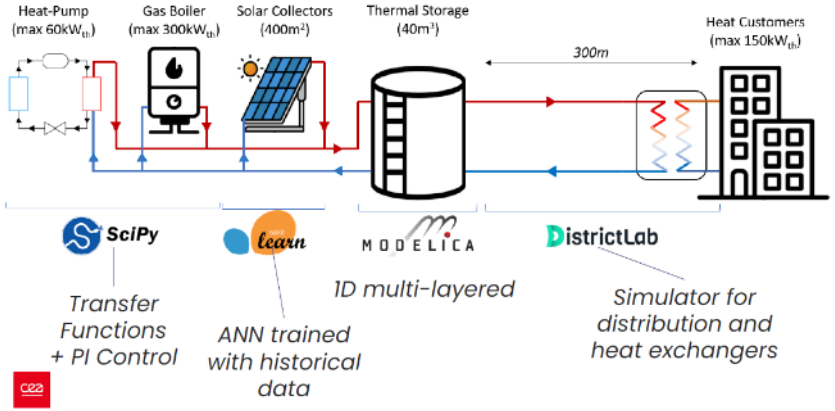
EMS et pilotage



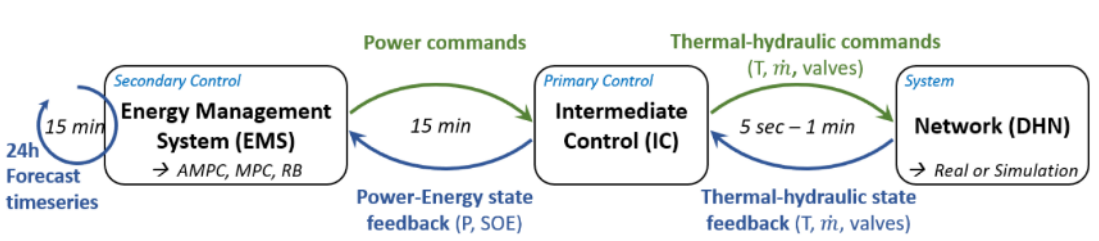


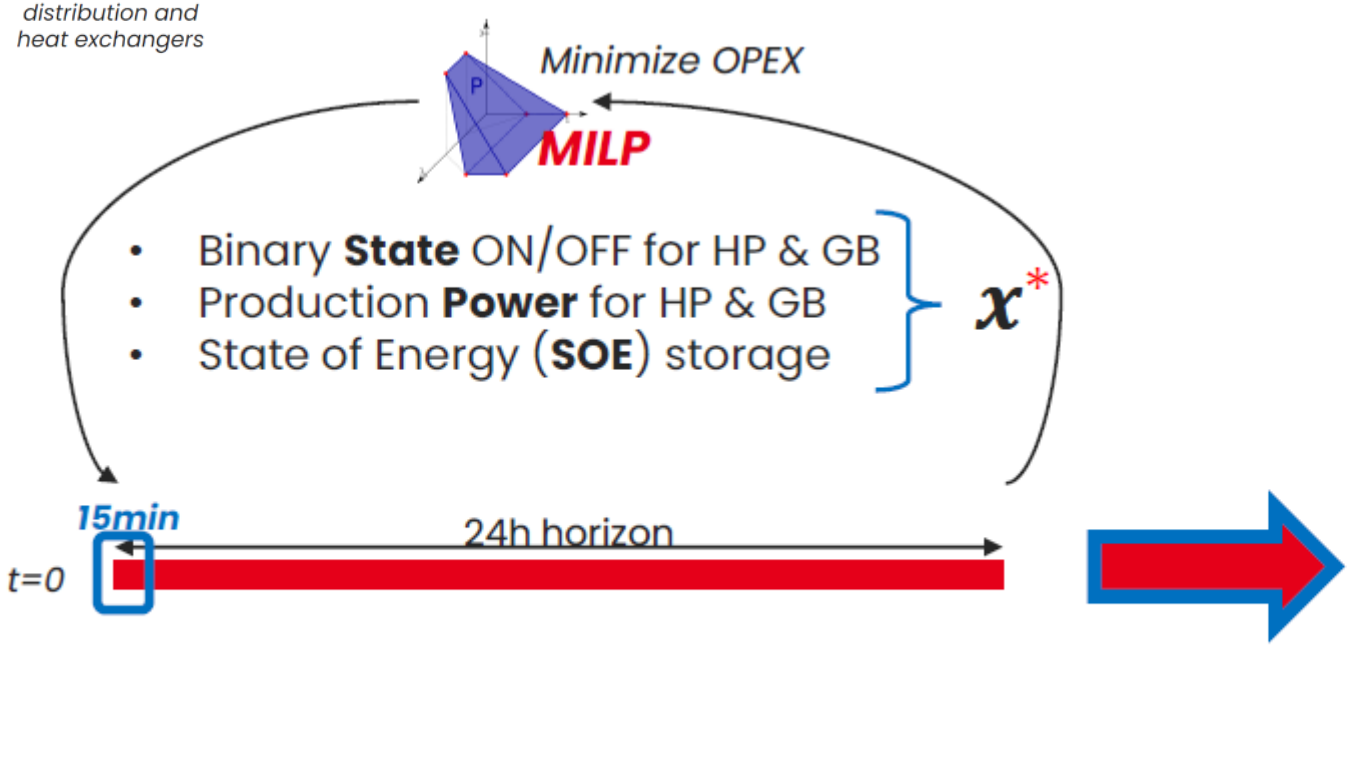
Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

Modélisation, entrainement … modèle global



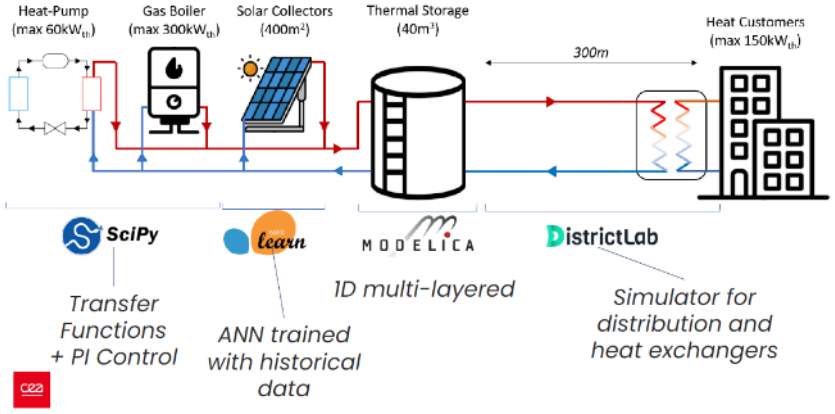
EMS et pilotage



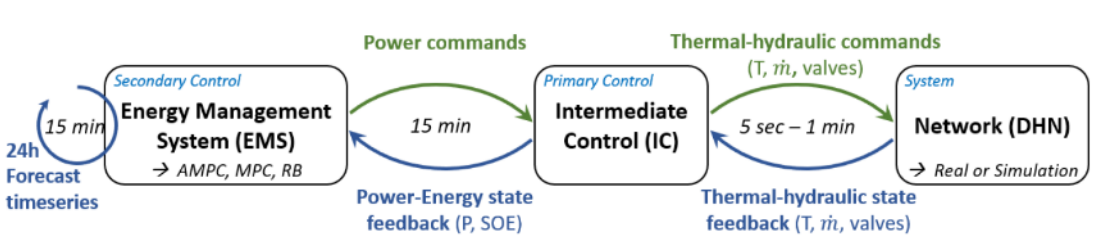


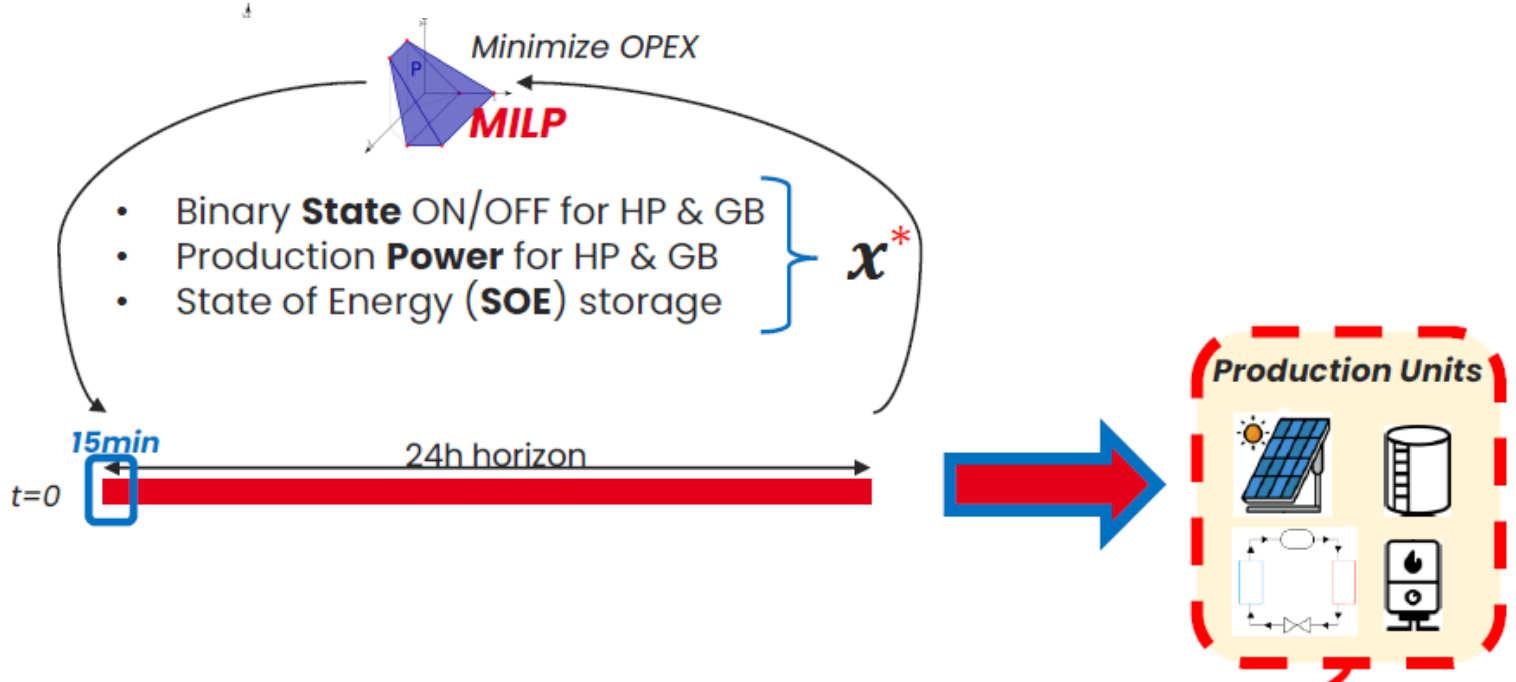
Exemple d'optimisation/pilotage global - CALORIE

Modélisation, entrainement … modèle global



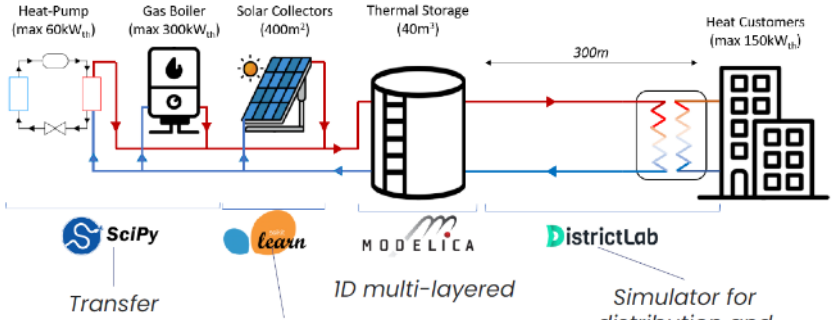
EMS et pilotage



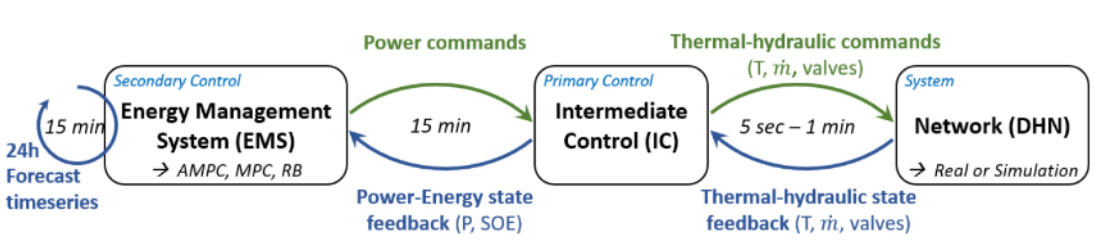


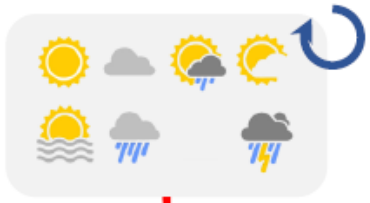
Exemple d'optimisation/pilotage global - CALORIE

Modélisation, entrainement … modèle global



EMS et pilotage





- Building thermal **demand**
- **Solar** thermal potential
- Initial **system state**

θ

Minimize OPEX

MILP

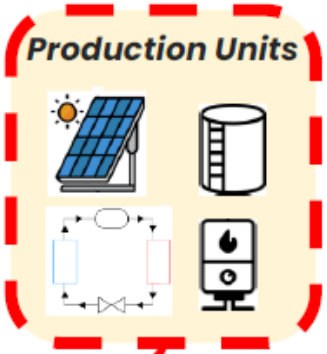
- Binary **State** ON/OFF for HP & GB
- Production **Power** for HP & GB
- State of Energy (**SOE**) storage

x^*

15min

t=0

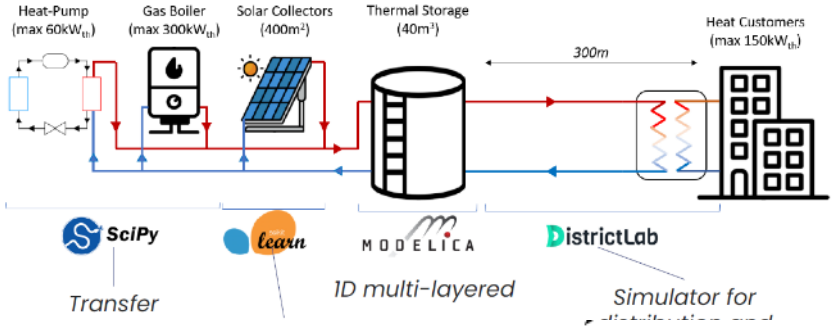
24h horizon



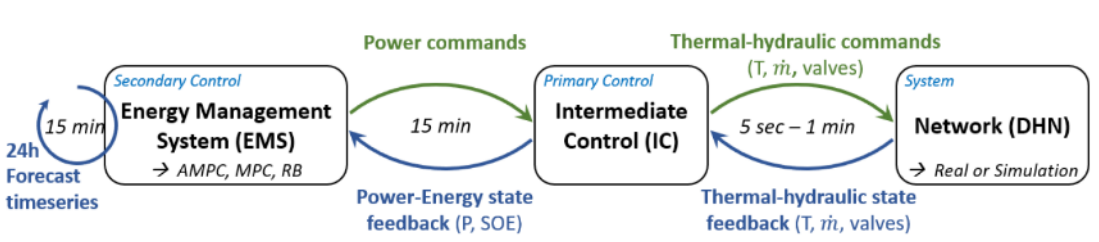
Intermediate Control Reconstruction from Sensors Feedback

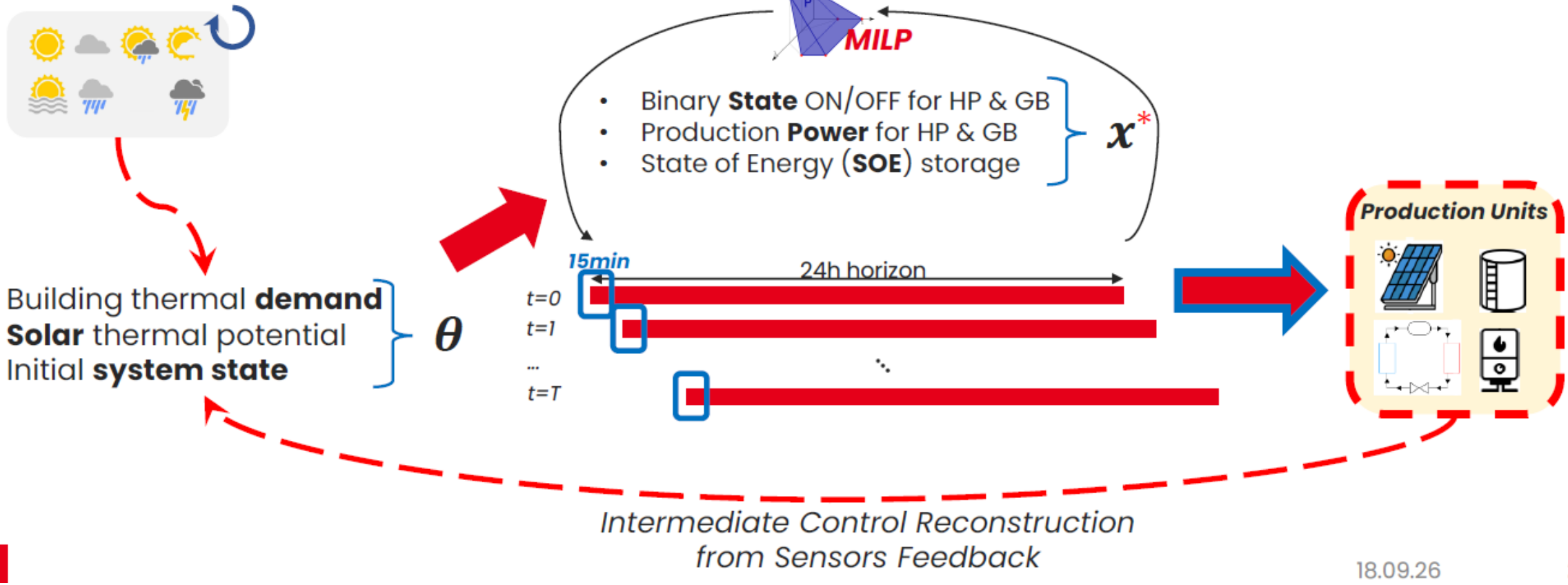
Exemple d'optimisation/pilotage global - CALORIE

Modélisation, entrainement … modèle global



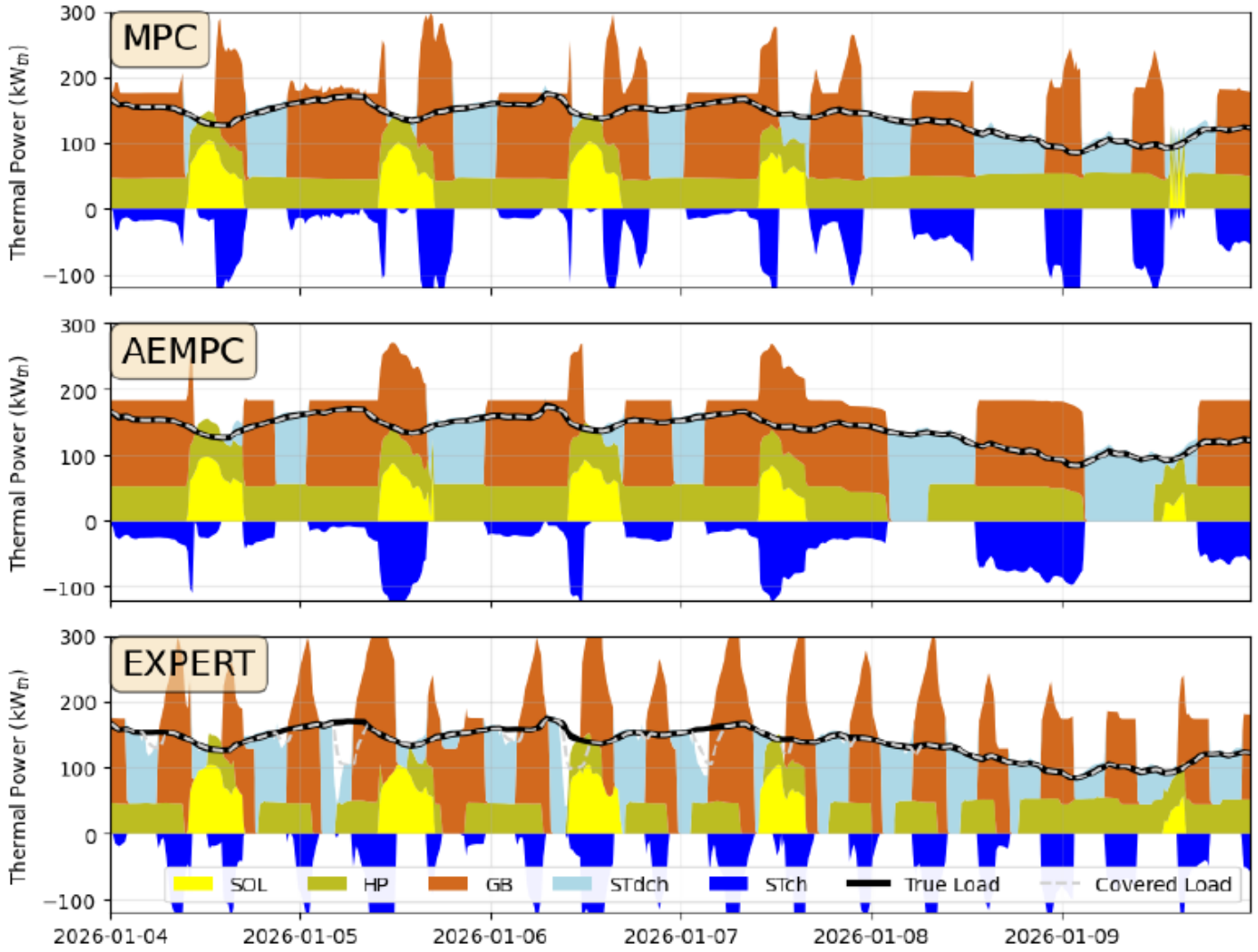
EMS et pilotage

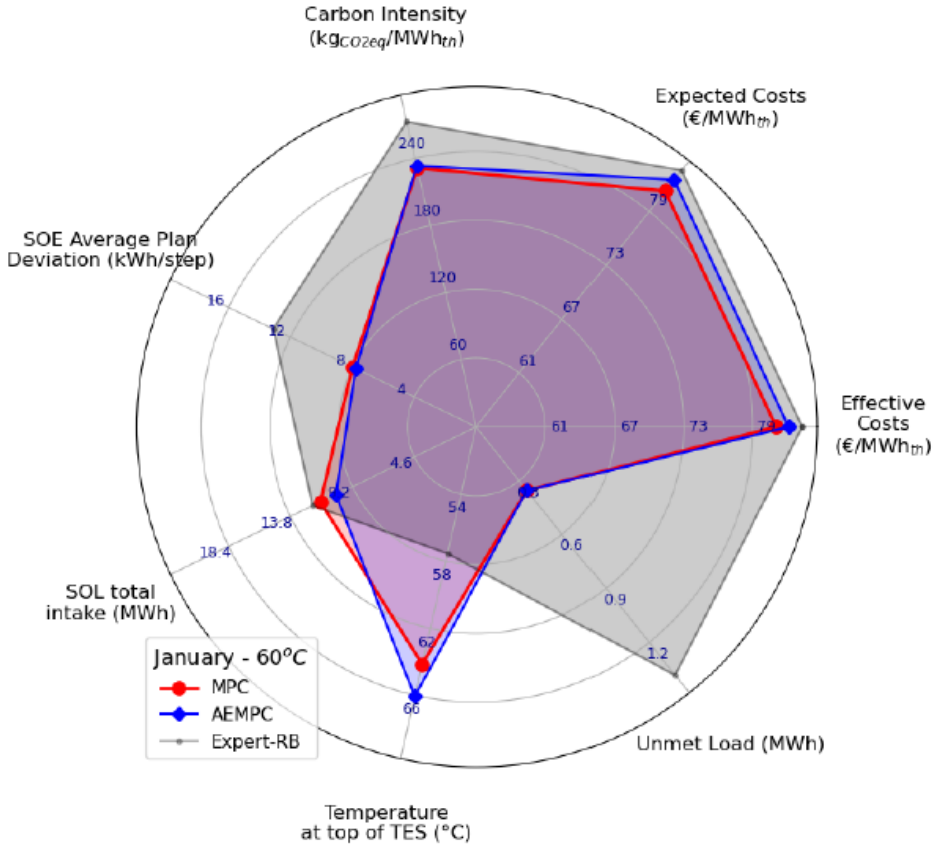




Exemple d’optimisation/pilotage global – CALORIE

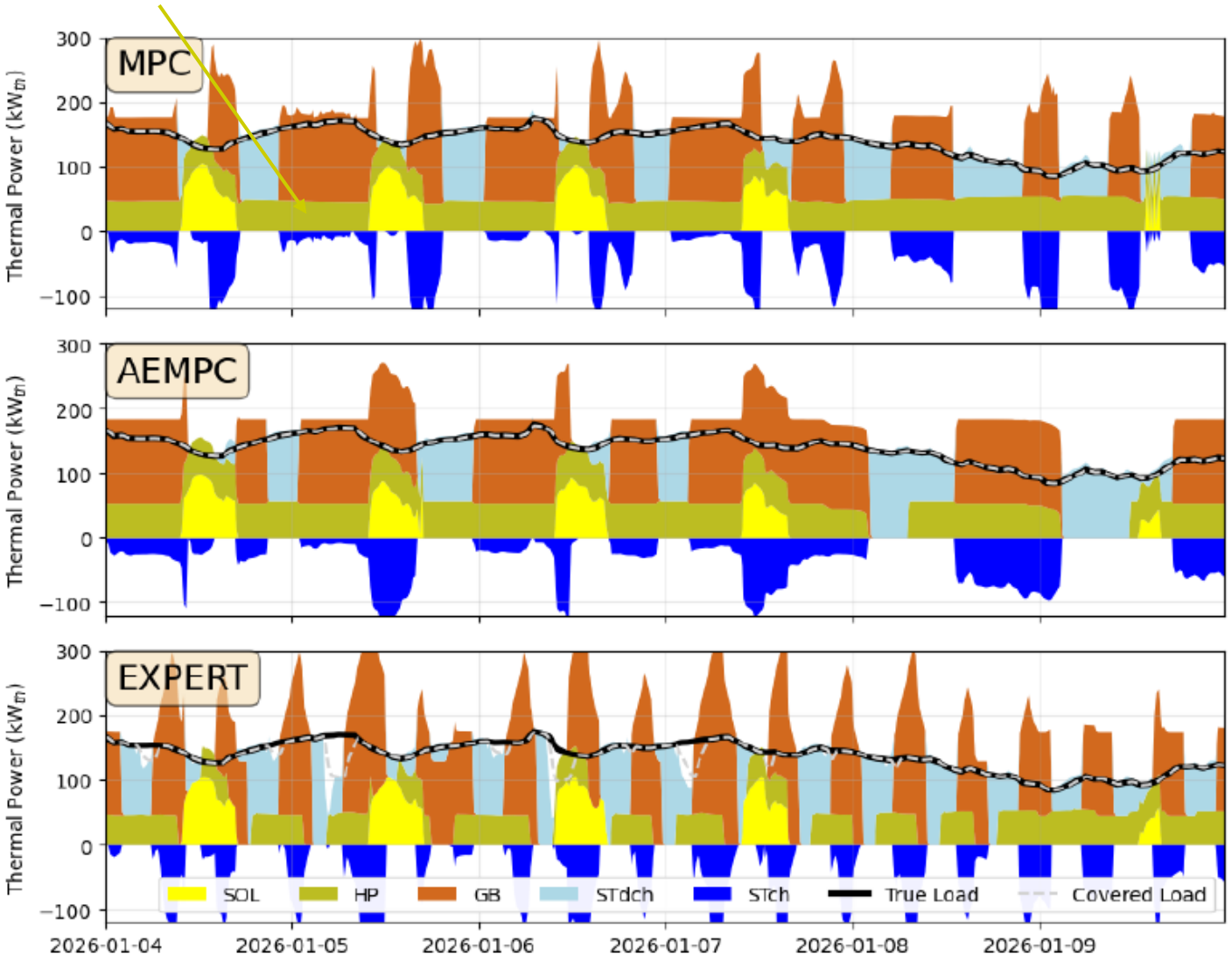
Exemple d'optimisation/pilotage global - CALORIE

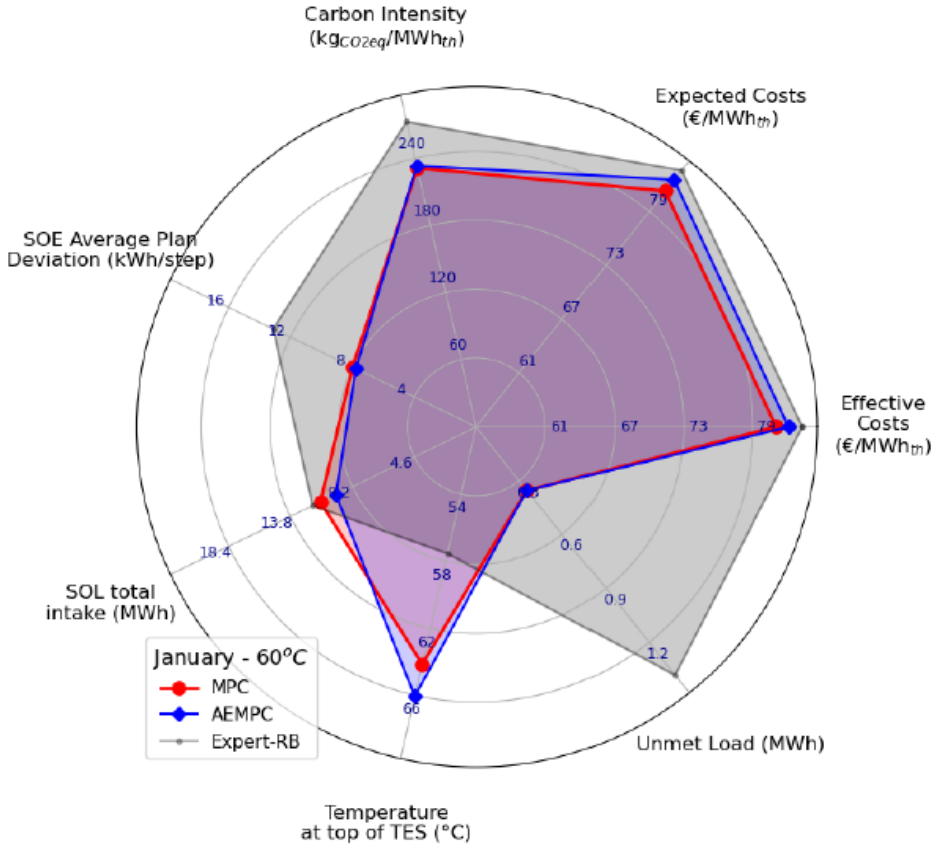




Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

Pas d'arrêt de la HP

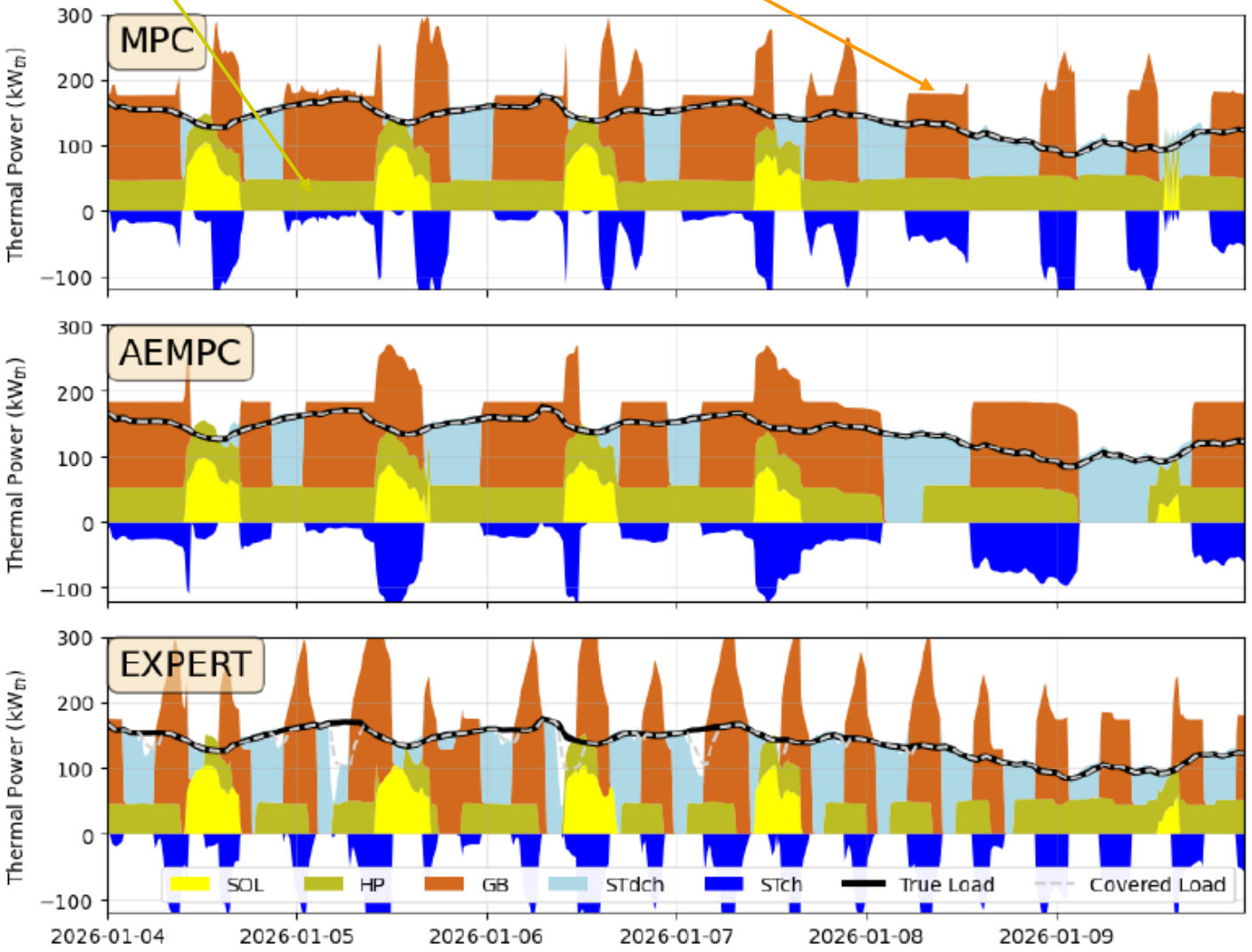


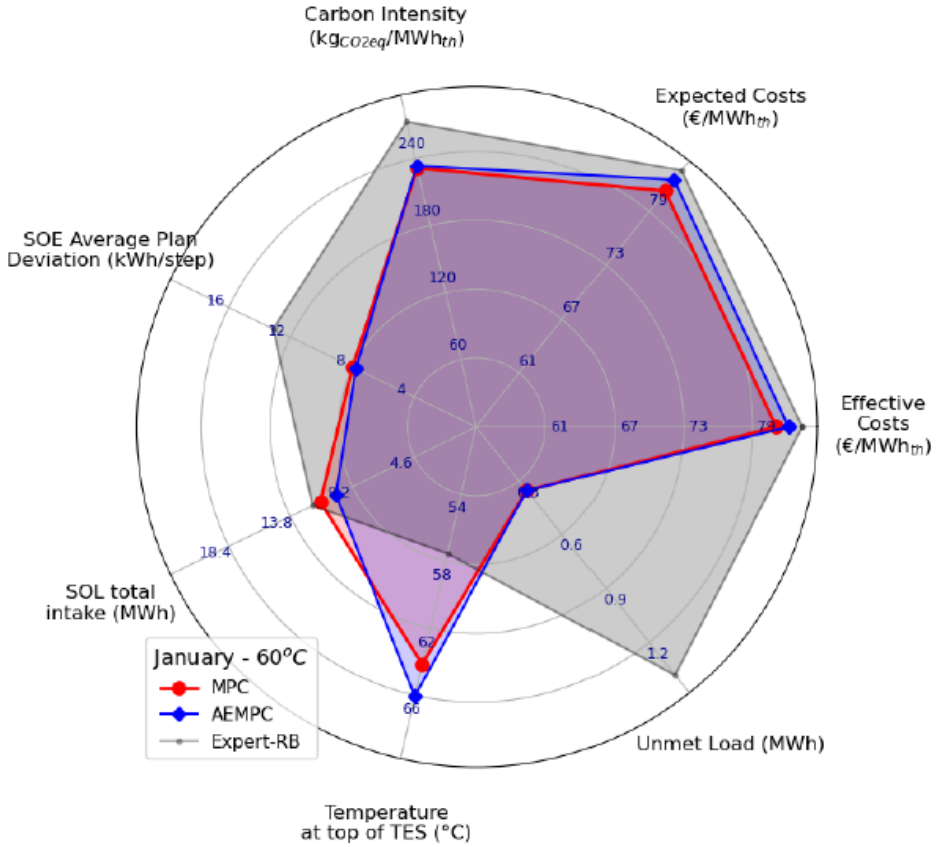


Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

Pas d'arrêt de la HP

Moins de ON/OFF et moins de puissance sur le boiler gaz



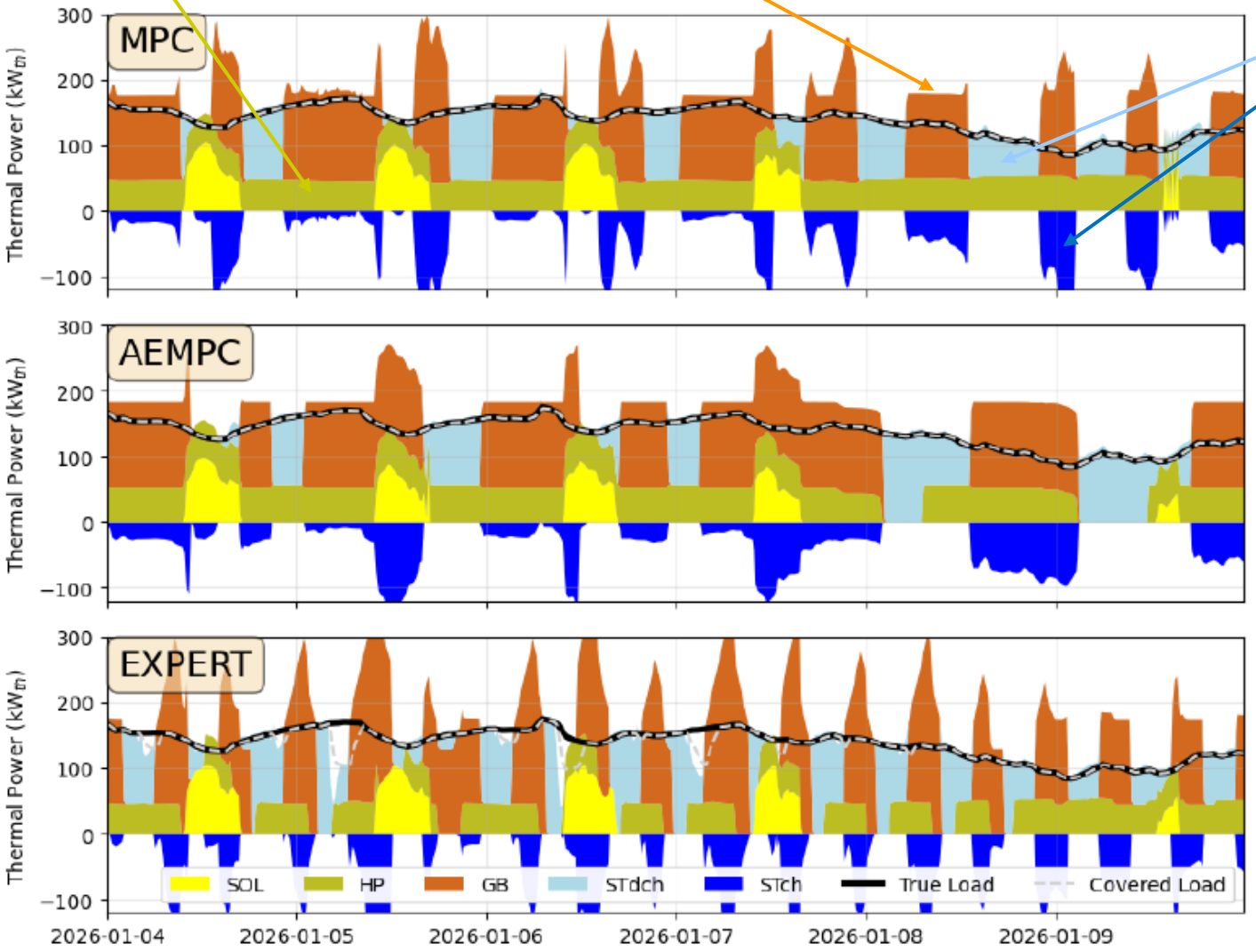


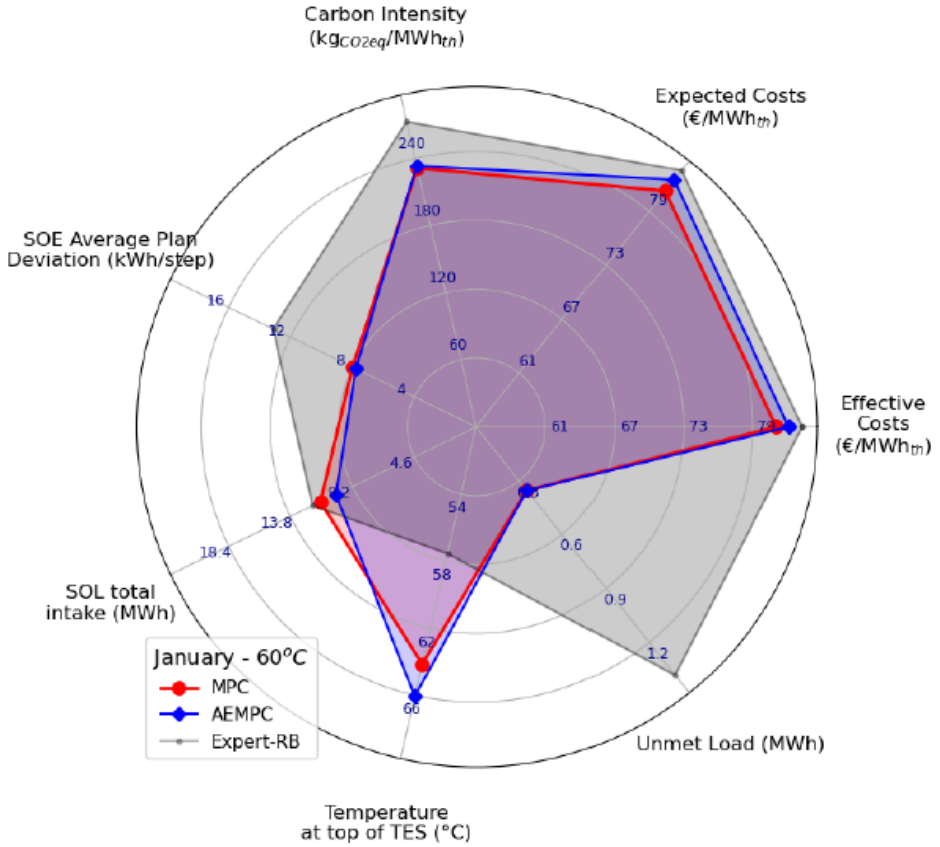
Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

Pas d'arrêt de la HP

Moins de ON/OFF et moins de puissance sur le boiler gaz

Cycles charge/décharge sur le TES plus longs et moins fréquents



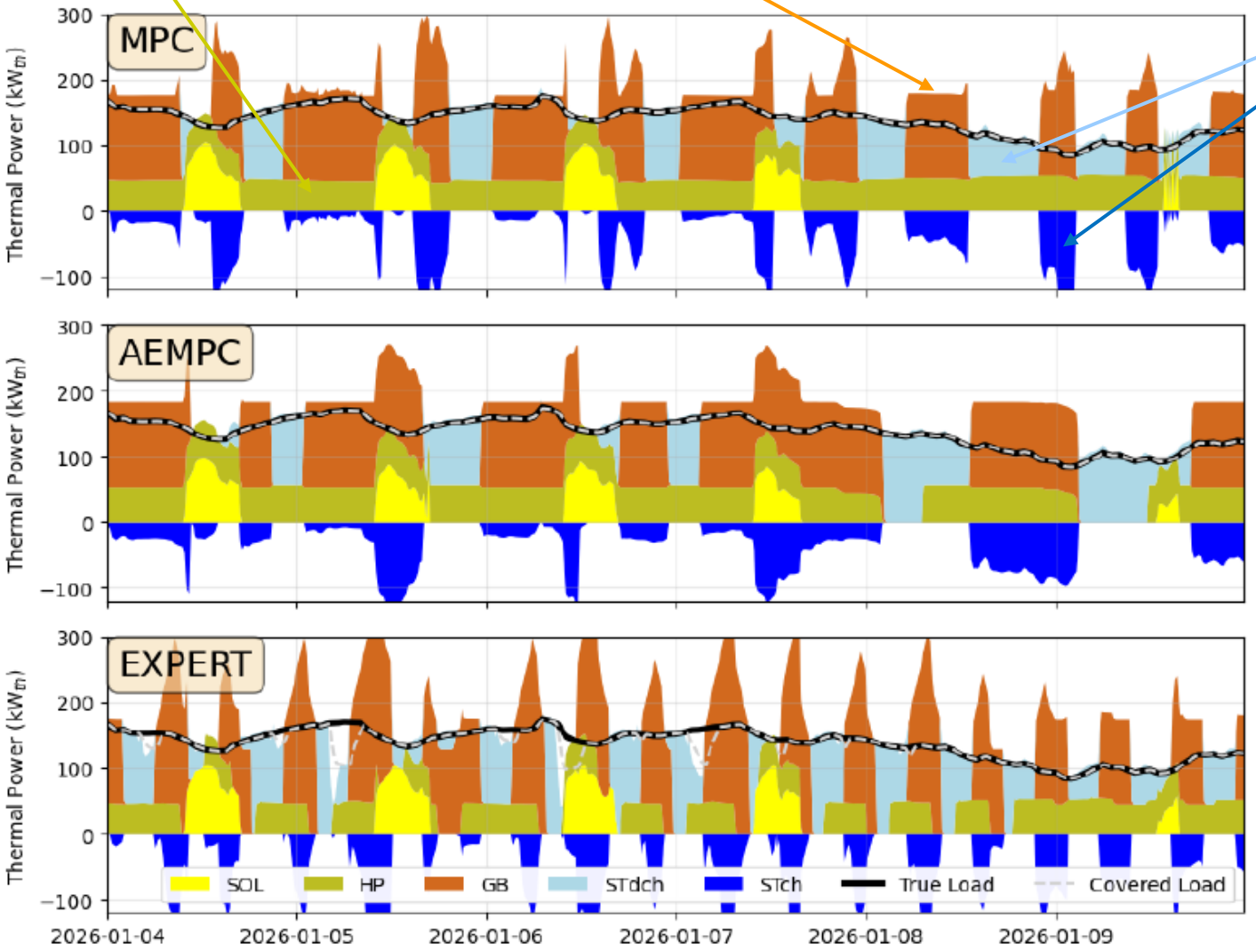


Exemple d'optimisation/pilotage global – CALORIE

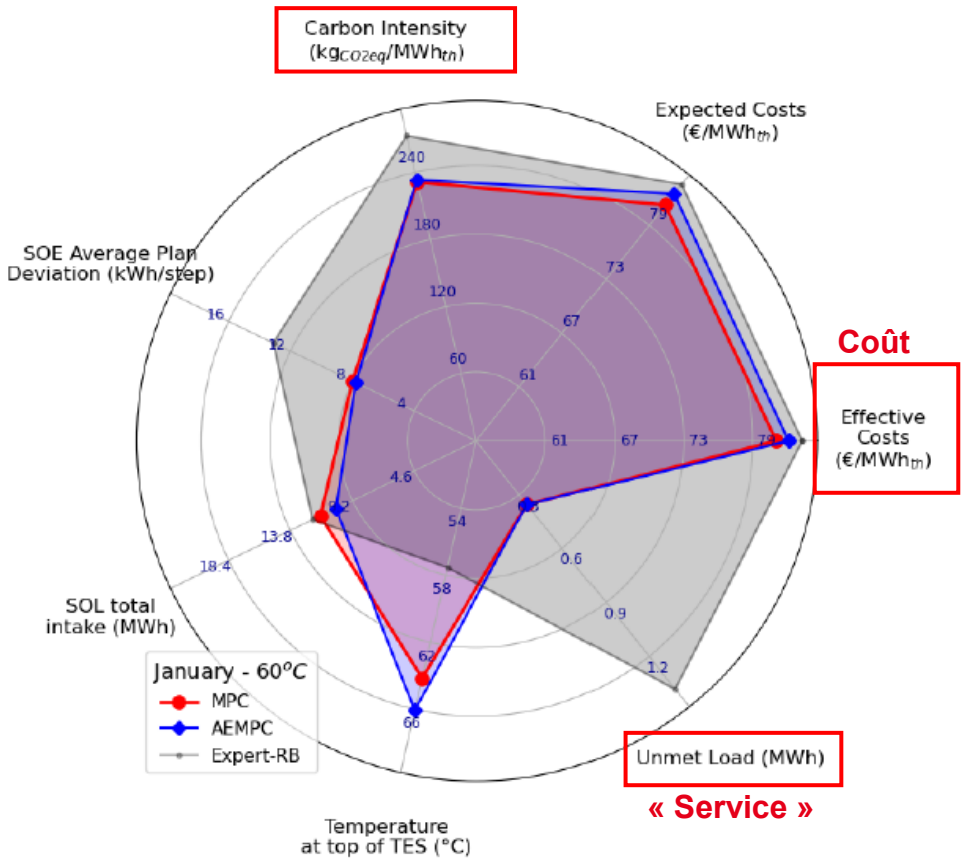
Pas d'arrêt de la HP

Moins de ON/OFF et moins de puissance sur le boiler gaz

Cycles charge/décharge sur le TES plus longs et moins fréquents



CO2



Coût

« Service »