



**HAL**  
open science

# Optimisation MILP de la stratégie de contrôle des centrales à concentration solaire thermique hybrides pour la production de chaleur industrielle

Simon Kamerling, Valéry Vuillerme, Sylvain Rodat

## ► To cite this version:

Simon Kamerling, Valéry Vuillerme, Sylvain Rodat. Optimisation MILP de la stratégie de contrôle des centrales à concentration solaire thermique hybrides pour la production de chaleur industrielle. JNES 2022 - Journées Nationales de L'énergie Solaire, Jun 2022, Albi, France. hal-03843266

**HAL Id: hal-03843266**

**<https://hal.science/hal-03843266>**

Submitted on 8 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# OPTIMISATION MILP DE LA STRATÉGIE DE CONTRÔLE DES CENTRALES À CONCENTRATION SOLAIRE THERMIQUE HYBRIDE POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR INDUSTRIELLE

Co-optimisation de la stratégie de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration et d'une centrale solaire plan hybridées avec une chaudière biomasse pour la production de chaleur industrielle à deux niveaux de température

Nom du Doctorant : Simon KAMERLING

Encadrant CEA : Valéry VUILLERME

Directeur de Thèse : Sylvain RODAT (CNRS-PROMES)

Chef du Laboratoire : Nathalie DUPASSIEUX

Ecole Doctorale : IMEP2

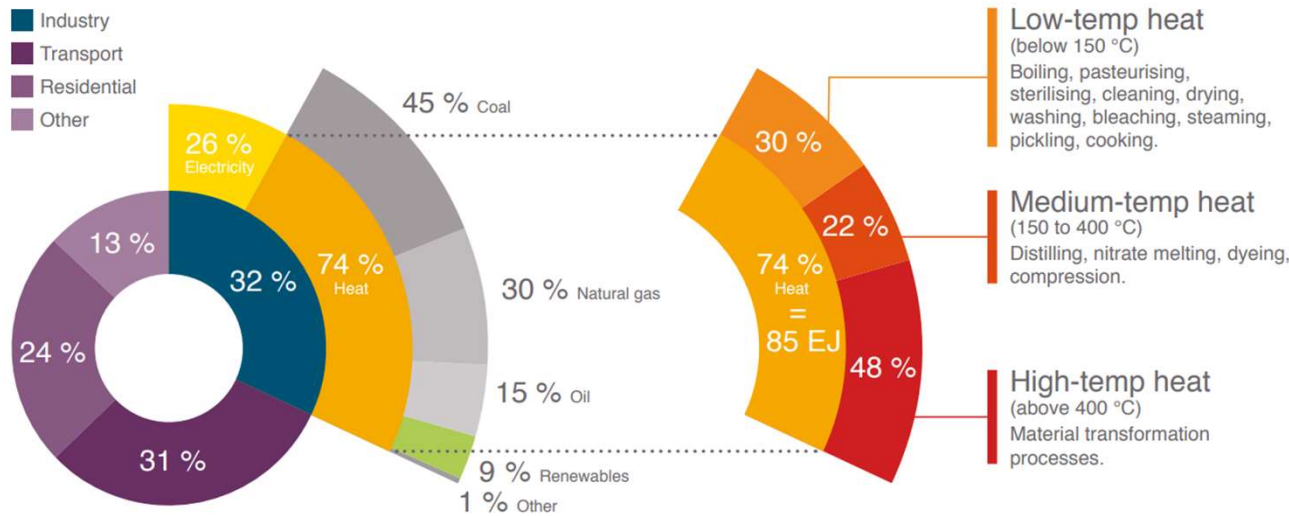
Dates de démarrage/de fin: 15/01/2020 – 15/01/2023

Type de financement : Ecole Polytechnique

**liten**

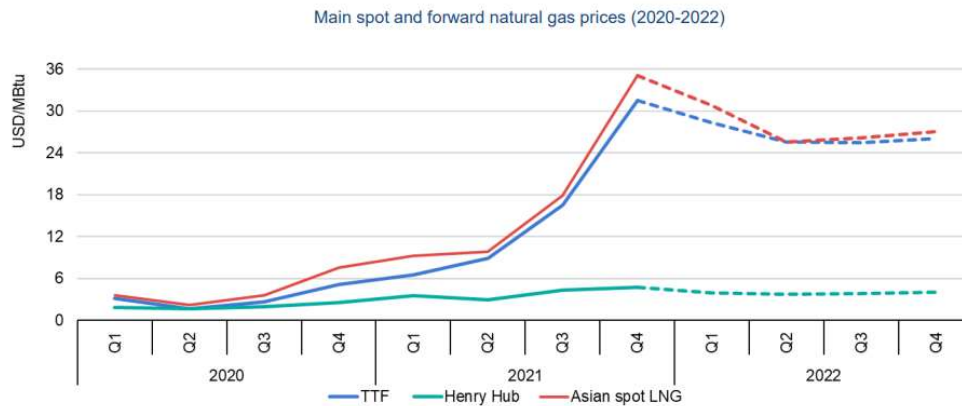


1. Contexte – Enjeux
2. Approche générale
3. Système envisagé
4. Résultats d'un cas d'étude
5. Conclusions et Perspectives
6. Références
7. Bonus

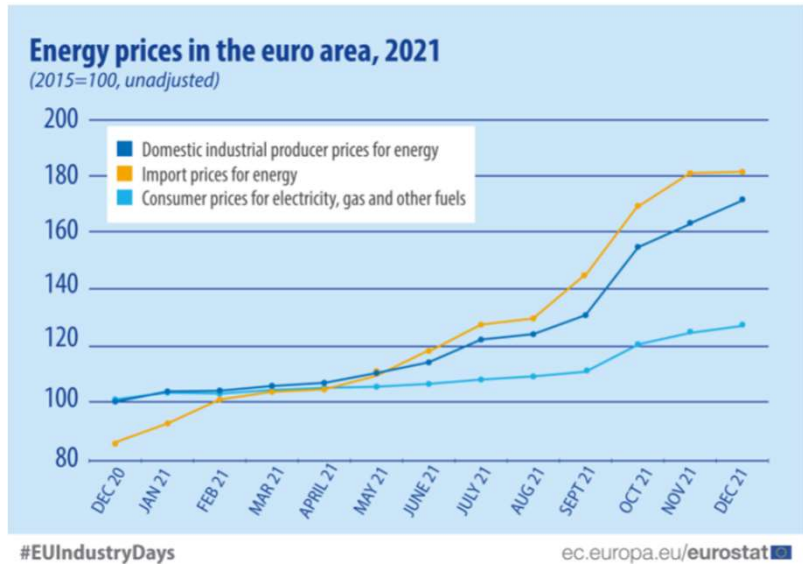


Répartition de l'usage d'énergie dans l'industrie (Solar-Payback, 2017)

Chaleur industrielle: 8 Gt CO<sub>2</sub> par an -- 24% émissions mondiales (IEA, 2021)



Max. du prix du gaz en 2021, zone Europe: 91€/MWh<sub>th</sub>  
Source: IEA (2022)

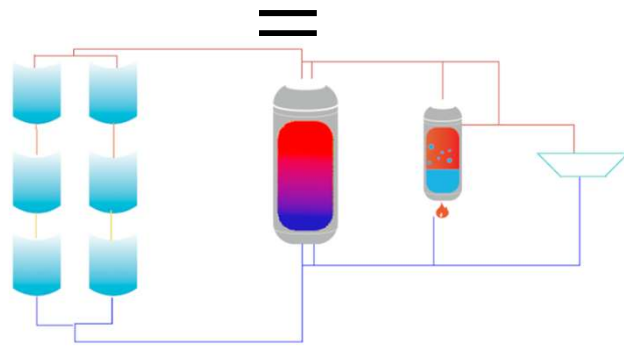


**Indépendance & Résilience?**

# CSP

(Concentrated Solar Power)

Concentration solaire pour la production flexible d'électricité

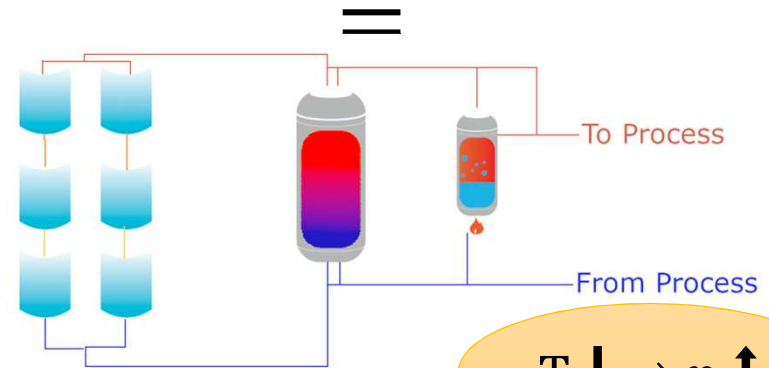


≠

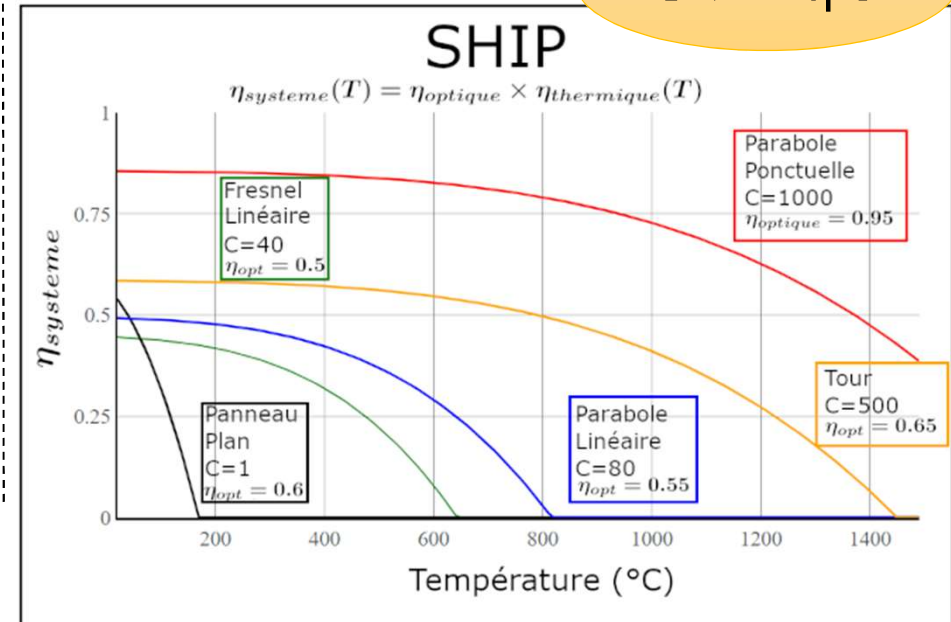
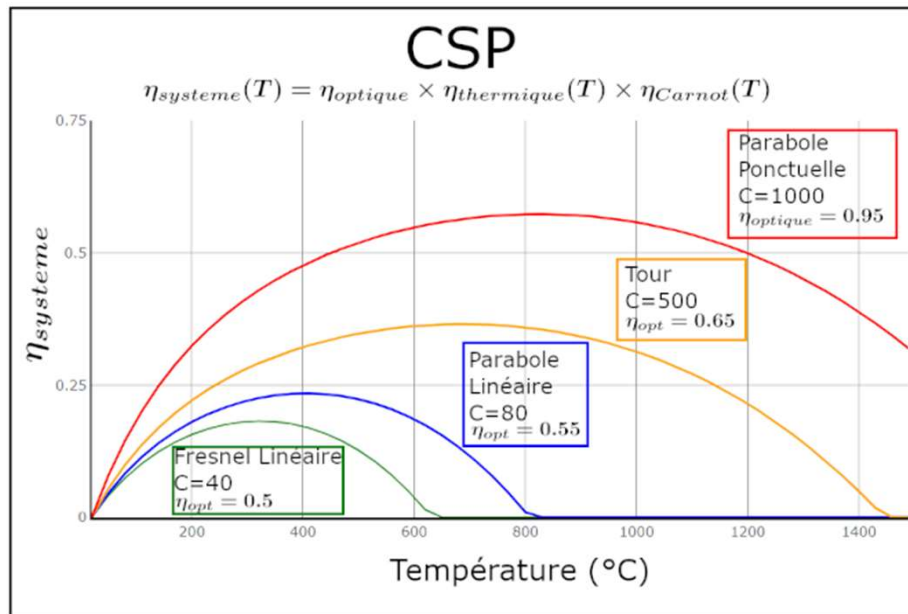
# SHIP

(Solar Heat for Industrial Processes)

Chaleur solaire pour les procédés industriels



$T \downarrow \Rightarrow \eta \uparrow$



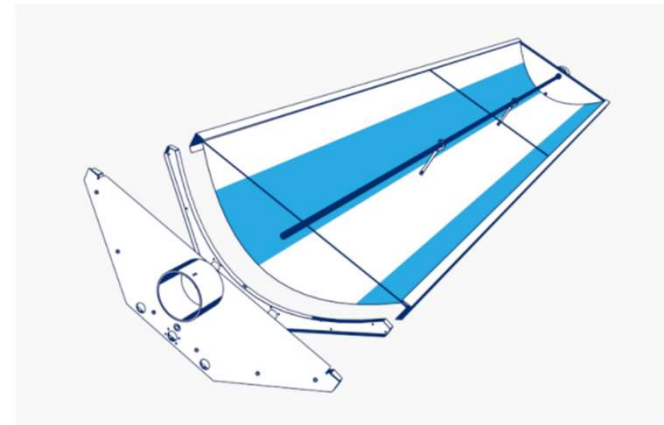
C: facteur de concentration



**newheat**  
fournisseur de chaleur renouvelable

- NewHeat (PME française): levée de 7M€, 40 MW<sub>th</sub> en exploitation  
Source: NewHeat

- Absolicon: **production** de collecteur « low cost ». A Grenoble, 25€/MWh<sub>th</sub> pour de la chaleur solaire à 160°C. Espagne: 15€/MWh<sub>th</sub>.  
Source: Absolicon (simulateur)



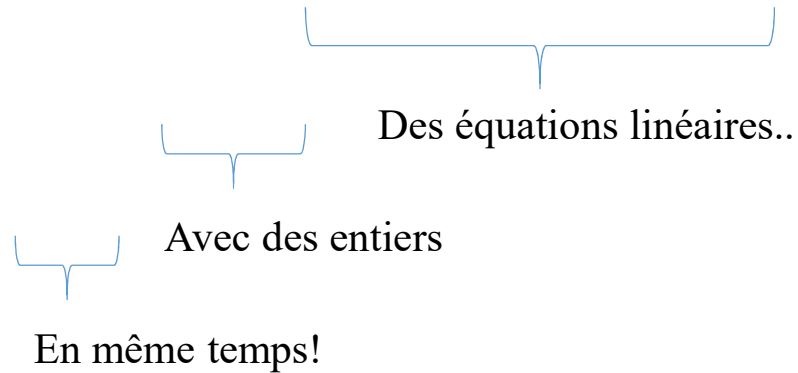
- Heliogen (start-up USA): **prédit** une chaleur solaire à 1200°C à 10\$/MWh<sub>th</sub> grâce à l'IA.  
Source: SolarPaces

Température

**Solaire thermique & chaleur industrielle: <1%; EnR: <10%**



## Mixed Integer Linear Programming



Concrètement:

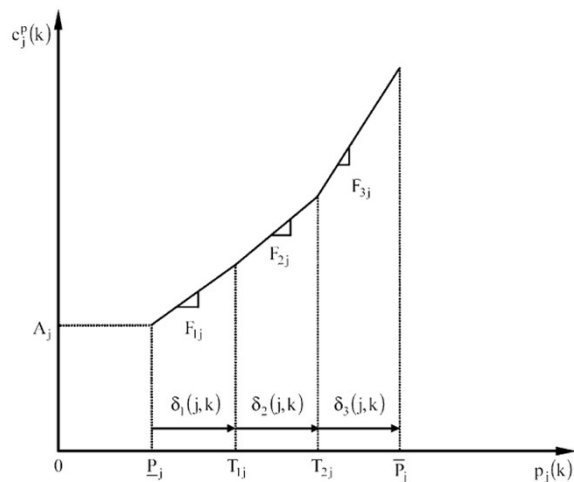
- Variables réelles, entières ou binaires
- Fonction coût linéaire -> objectif à minimiser
- Contraintes linéaires -> modèle du système
- Des astuces de linéarisation

Mais:

Une solution optimale en temps court

## Exemples

### Fonction coût exponentielle



Produit d'une variable binaire  
et d'une variable réelle

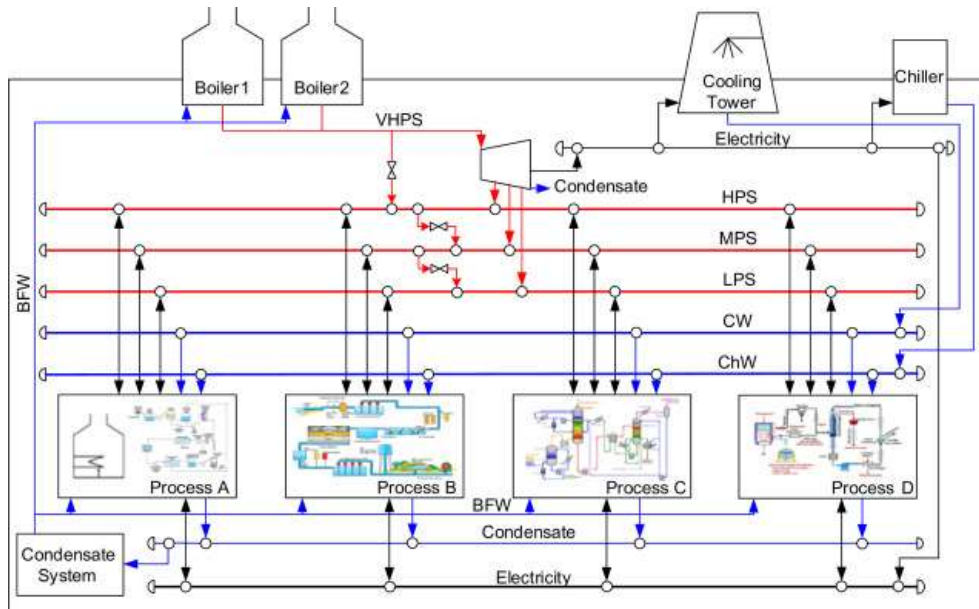
$\epsilon$ : variable binaire

$A$ : variable réelle,  $A \in [0; \bar{A}]$

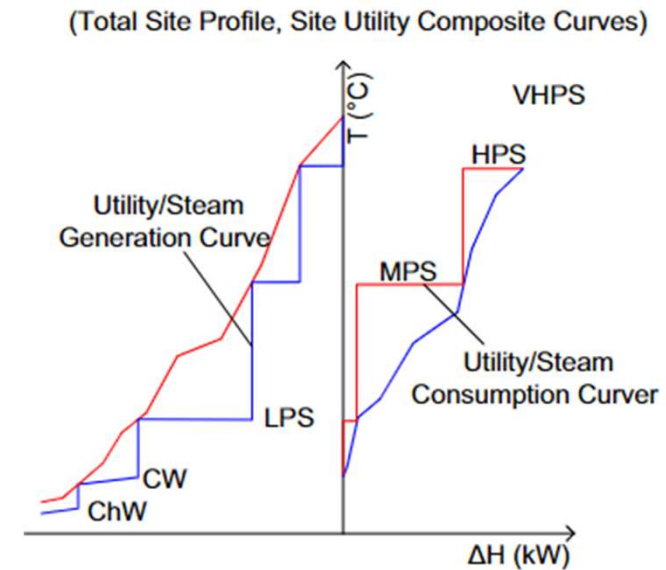
$z = \epsilon * A$ , variable produit.

$$\begin{aligned} 0 &\leq z \leq \bar{A} * \epsilon \\ z &\leq A \\ z &\geq A - \bar{A} * (1 - \epsilon) \end{aligned}$$

Réf.: Carrión et al., 2006



Réf.: Peng Yen Liew et al.



Beaucoup de travaux au niveau design (Pinch Analysis):

- optimisation du réseau d'échangeurs de chaleur
- optimisation des niveaux de température des utilités
- placement des producteurs d'énergie mécanique/électrique

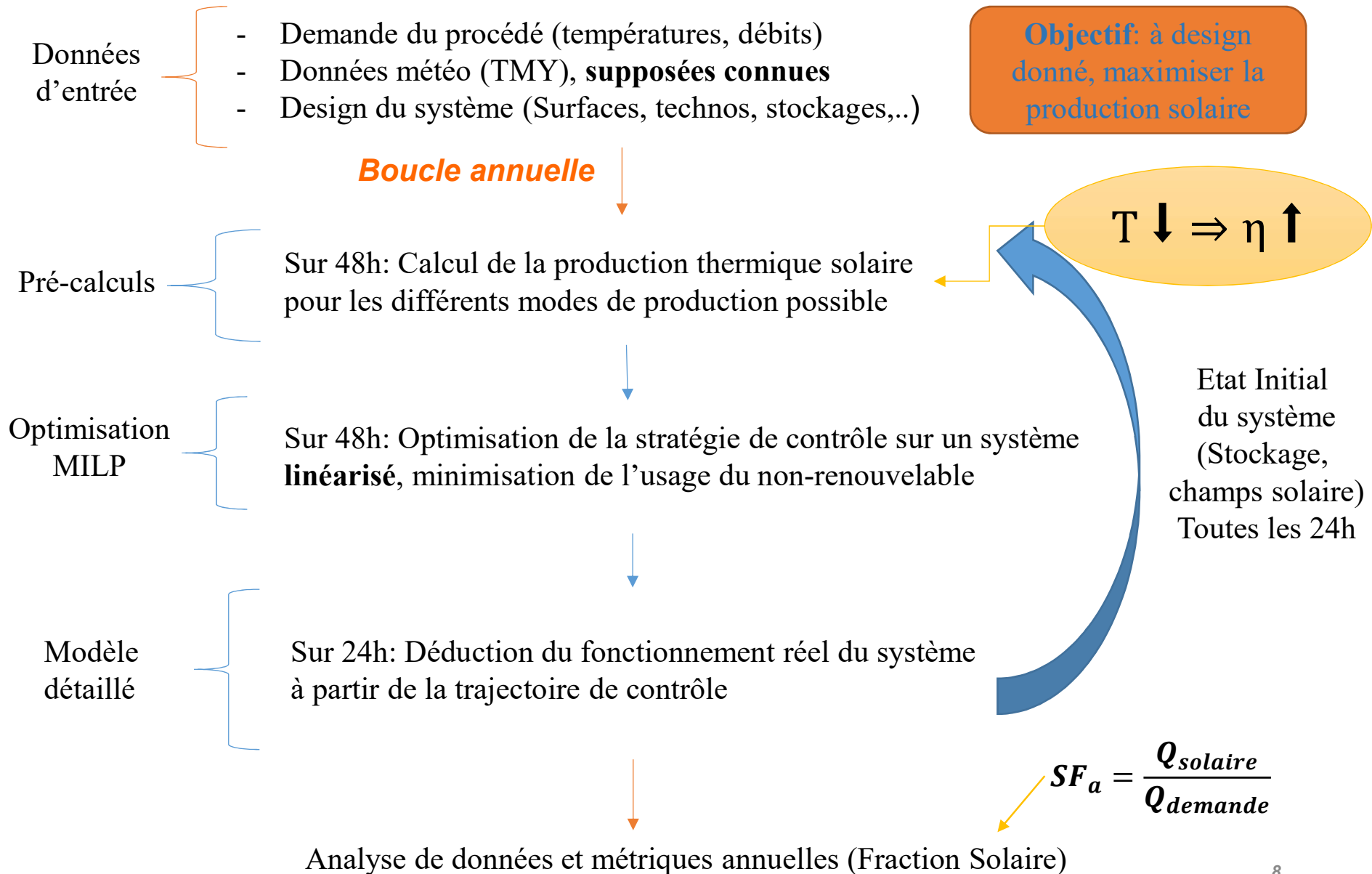
Mais... Peu d'optimisation sur le contrôle.

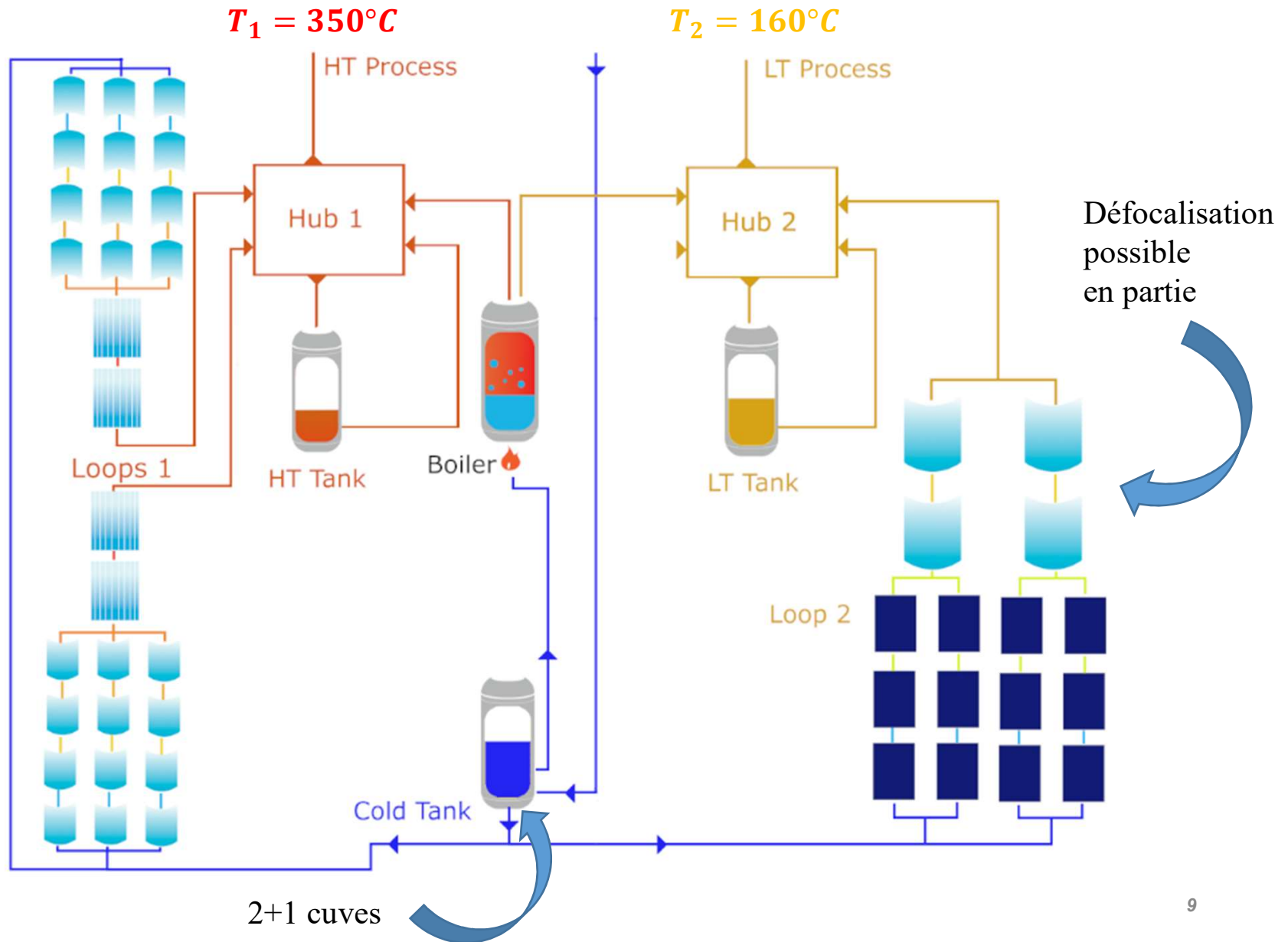
Analyse Pinch limitée pour les besoins non constants (variabilité de la ressource, demande variable,...)

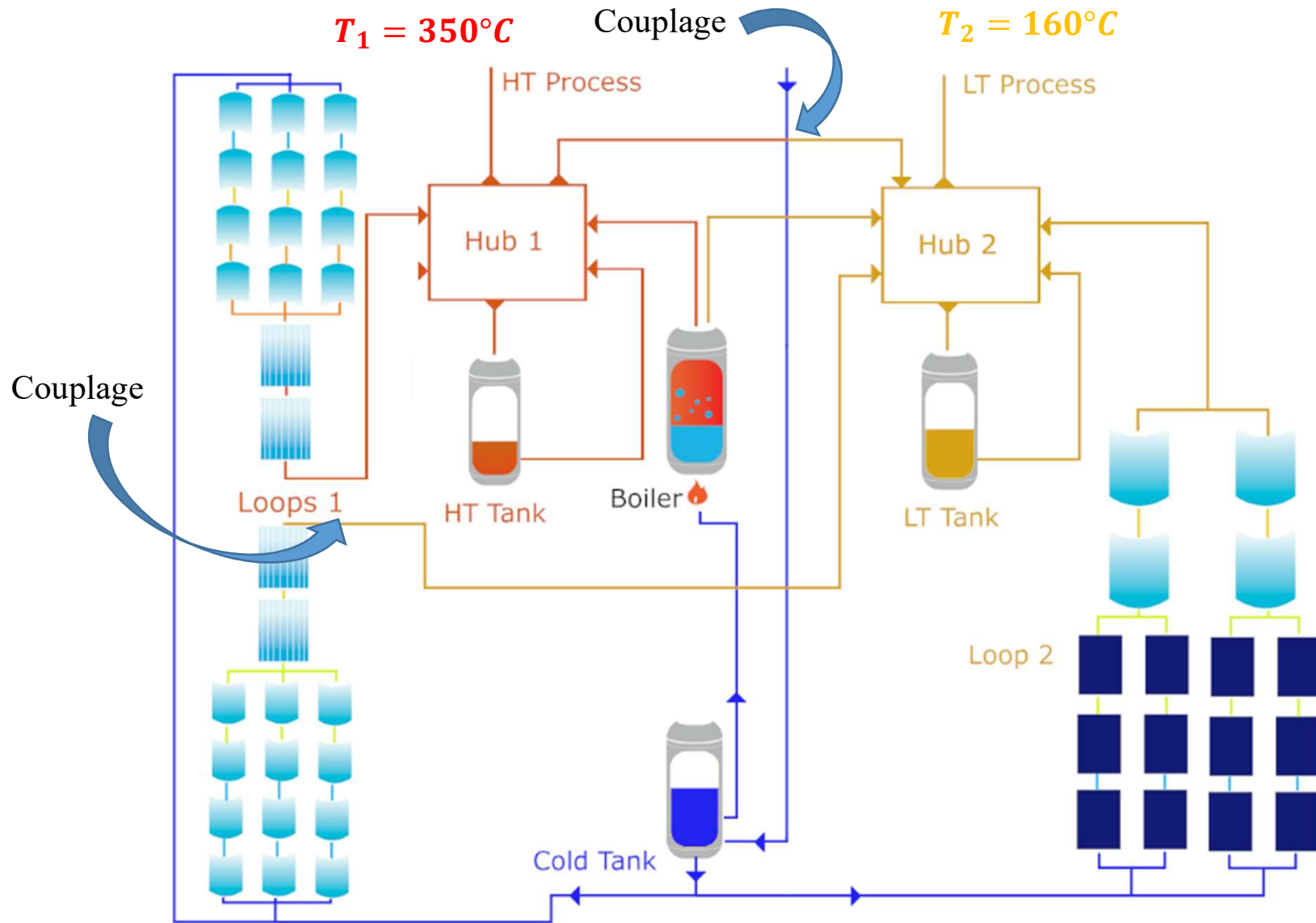
**Objectif:** montrer l'intérêt du couplage des systèmes, simplifier le mécanisme de contrôle & optimiser le productible solaire

-> **Simplifications:** 2 niveaux de température, 2 stockages, 2 technologies différentes



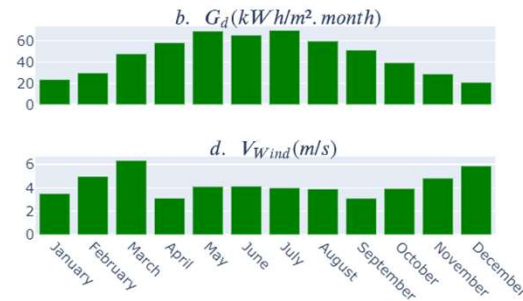
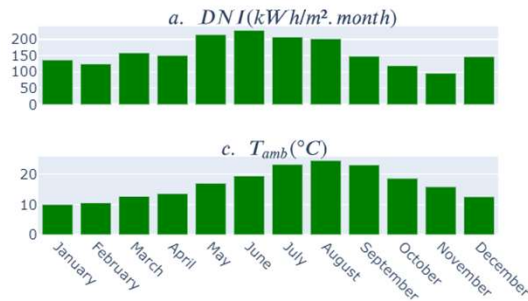
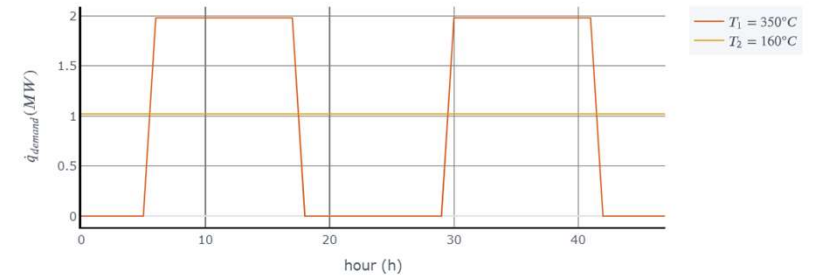






**Données du procédé**

Heat demand in the system for both processes

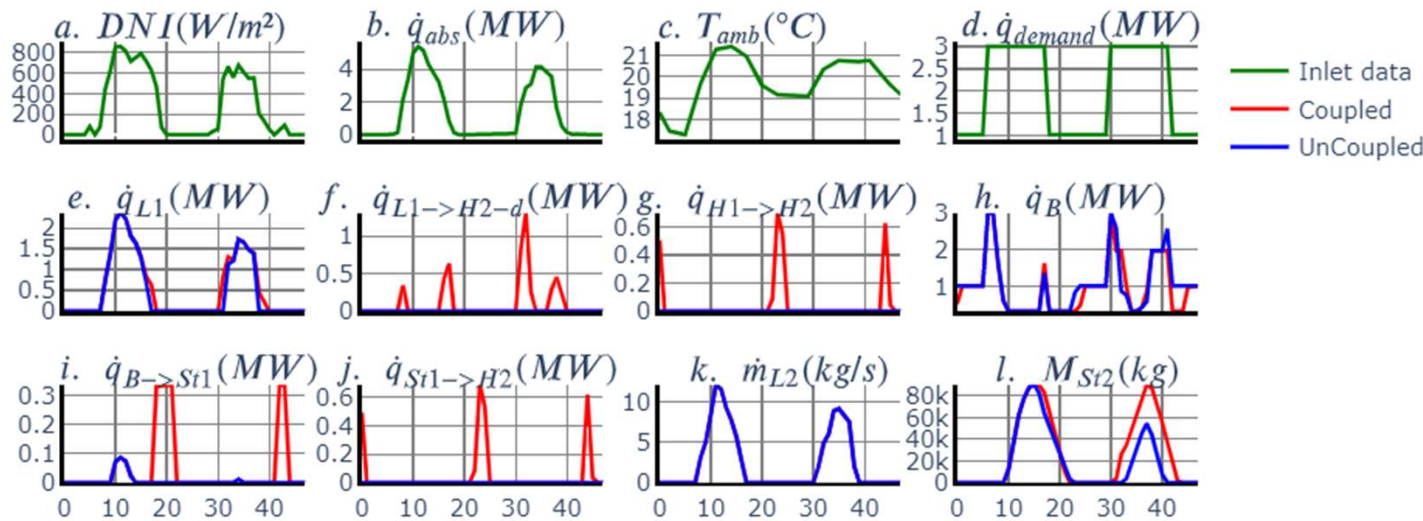


**Données  
Météorologiques  
(Tarragona,  
Espagne)**

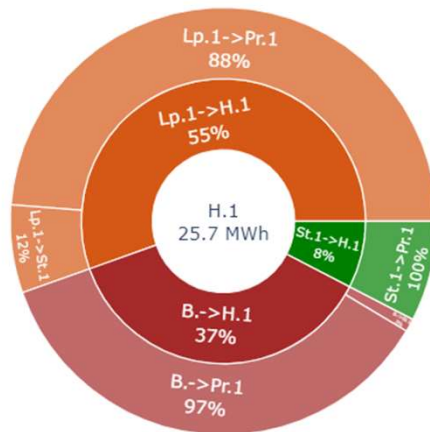
**Données de design du système**

Loops	Loop 1	Loop 2	Stockages	Stockage 1	Stockage 2
Nombres	10	10	Volume	70 m <sup>3</sup>	98 m <sup>3</sup>
Série	6 PTC, 10 LFR	4 FPC, 4 PTC	Capacité	9.9 MWh	5.1 MWh
Parallèle	4 PTC, 1 LFR	13 FPC, 13 PTC	Heures de stockage	10 h	5 h
Aire totale	4320 m <sup>2</sup>	4420 m <sup>2</sup>			
Puissance au design	2.5 MW	2.5 MW			

A53

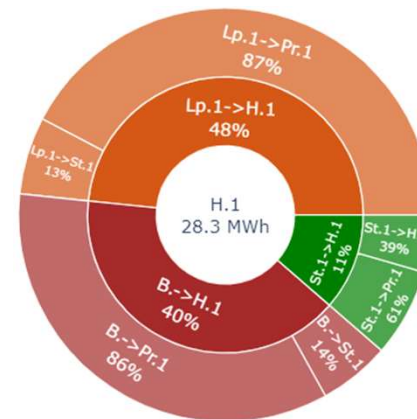
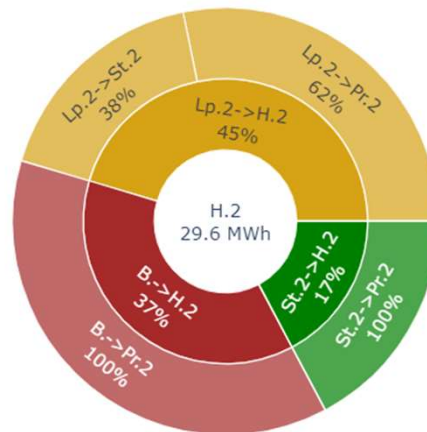


Sigle	Définition
Lp.1,2	Loop 1,2
B.	Boiler
H.1,2	Hub 1,2
St.1,2	Stockage 1,2
$\dot{q}$	Flux de chaleur
$M$	Masse stockée
$\dot{m}$	Débit massique



Découplé

- Lp.1 ne tourne pas avec DNI trop bas
- St.2 remplit -> arrêt de la chaudière



Couplé

- Lp.1 tourne pour Processus 2
- St.2 remplit -> chaudière remplit St.1

A54  
A55  
A56

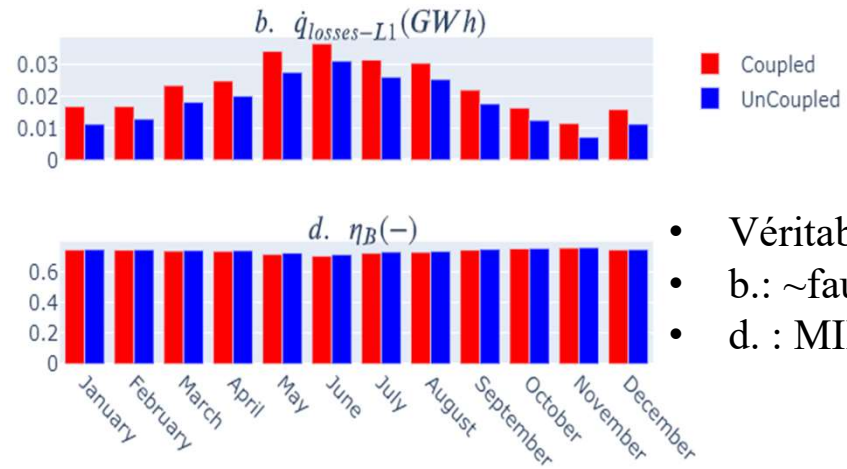
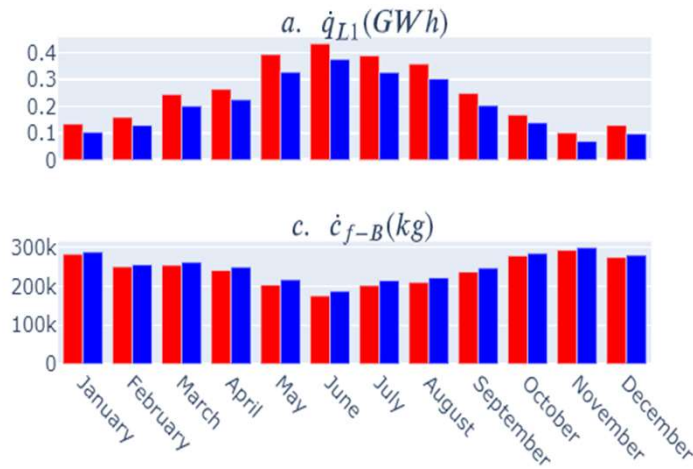
## Diapositive 12

---

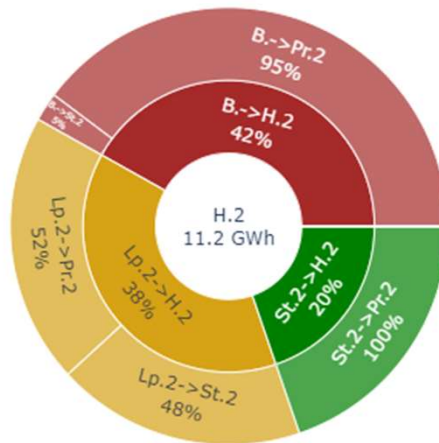
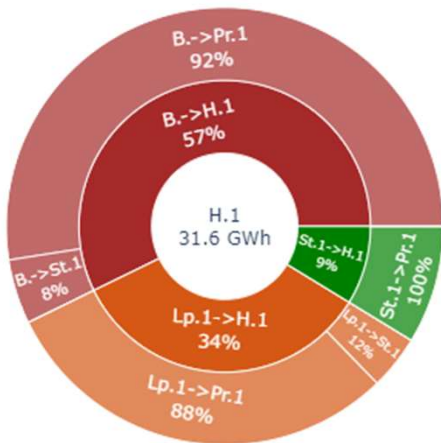
- A53**      Loop 1 tourne pour le Process 2 quand il ne peut pas tourner pour le Process 1  
Auteur; 27/06/2022
- A54**      Auteur; 27/06/2022
- A55**      Chaudière préfère travailler à plus basse efficacité pour remplir stockage puis grosse efficacité sur grosse quantité. Mais elle ne veut pas s'éteindre (coût trop important du redémarrage?)  
Auteur; 28/06/2022
- A56**      De plus, en mode couplé, elle peut stocker dans le Stockage 1 quand le stockage 2 est rempli!  
Auteur; 28/06/2022



A57  
A58  
A59  
A60



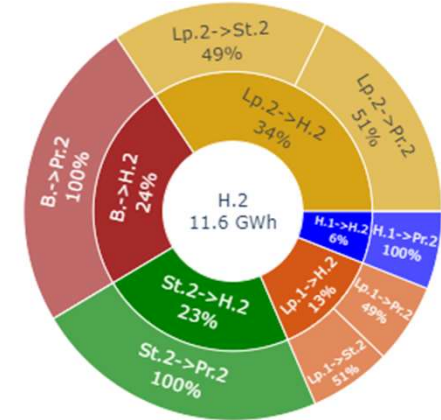
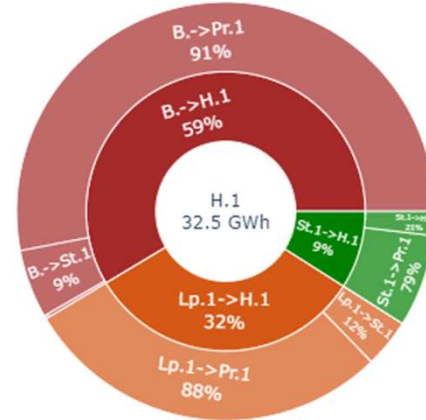
- Véritable gain: en a.
- b.: ~fausse piste
- d. : MILP à retravailler



Découplé

$3 \cdot 10^3$  t de biomasse

$SF_a = 33.2\%$



Couplé

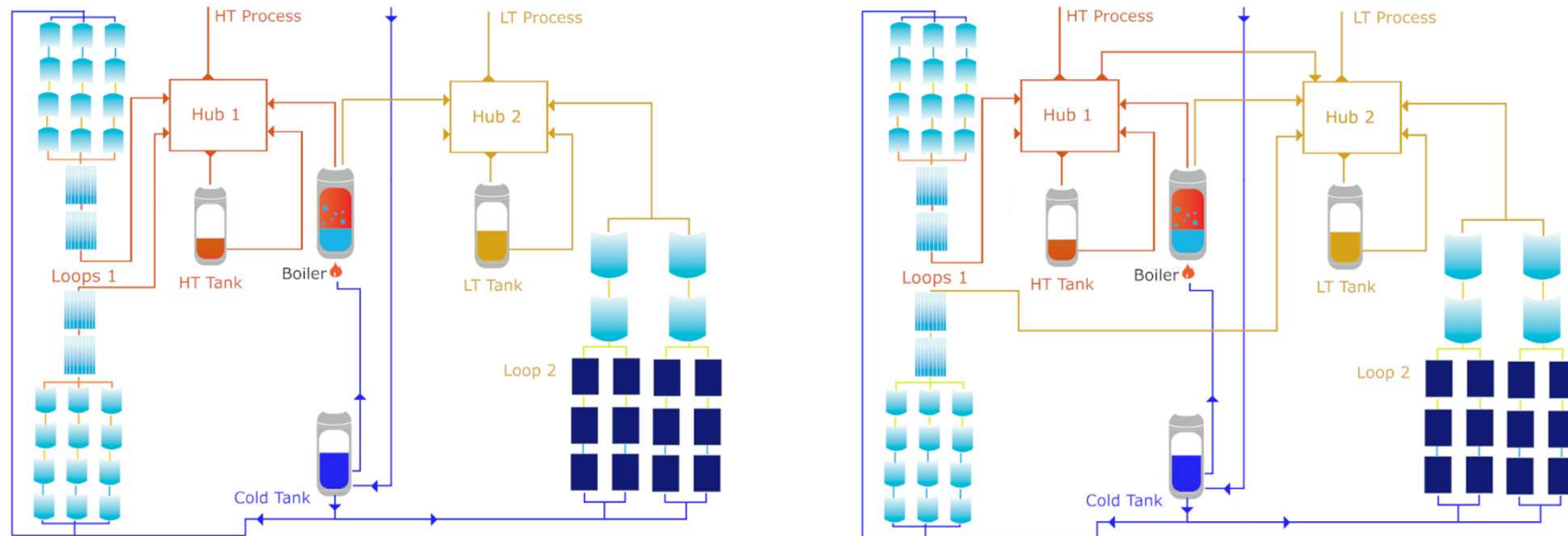
$2.9 \cdot 10^3$  t de biomasse  $\rightarrow$  -3.5%!

$SF_a = 35.8\%$

## Diapositive 13

---

- A57** On voit en a: augmentation du rproductible, mais pas lié aux pertes thermiques (j'ai mis pertes thermiques en post-process égales à 0 qd le système ne tourne pas). Vient du fait que ça tourne le matin, le soir, et quand il fait pas très beau, pour le process 2. A quantifier: impact de l'efficacité de la chaudière via le passage entre 1 et 2,, dur à estimer..  
*Auteur; 28/06/2022*
- A58** On voit aussi un léger défocus dans le Loop 2, mais pas compensé.  
*Auteur; 28/06/2022*
- A59** Dans les camemberts, on observe que le stockage 1 envoie une certaine partie au Hub 2, et que le boiler a tendance à stocker dans le stockage 1 quand c'est possible, pas forcément dans le 2; au contraire du système découplé  
*Auteur; 28/06/2022*
- A60** Différence entre gain de SF et gain en biomasse: viens de l'efficacité de la chaudière et des pertes thermiques du stockage, il faut que j'optimise sur le lien entre pertes du stockage vs efficacité de la chaudière  
*Auteur; 28/06/2022*



- Le couplage semble intéressant pour la réduction de la quantité de fuel nécessaire: gain de 3.5% sur un cas d'étude.
- A venir: analyse de sensibilité pour déterminer la pénalité optimale sur le stockage
- Des soucis face au manque de défocus du Loop 2 lorsque l'on augmente trop le Multiple Solaire (ajout d'un coût dans le MILP sur des aérothermes à prévoir)
- Optimisation du design via clustering (choix d'une série temporelle représentative) & algorithme génétique – encadrement d'un stage sur le sujet (E. Catel, adaptation du code de H. Sayegh), optimisation de ce système à venir -> St.1 énorme, vs. St.2 petit?<sup>14</sup>

## Perspectives

- Usage de thermoclines – pas évident:
  - Sortie de la zone de thermocline par en-dessous: envoi dans le champ solaire -> MILP itératif
  - Sortie de la zone de thermocline par au-dessus: envoi au processus -> back-up en série
- Changement de fluide caloporteur: eau pour *Direct Steam Generation*

### Q. Bonus:

Augmenter la fraction renouvelable, sans électricité et tout en coupant moins de bois...  
Comment faire?

- Absolicon: <https://www.absolicon.com/fs/>
- Carrión M, Arroyo JM. *A computational efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem*, 2006
- Ferrière A., *Eurec Master Course*, 2018
- IEA, 2021. *Renewables 2021 - Analysis and forecast to 2026* 81
- IEA (2022), *Gas Market Report*, Q1 2022, IEA, Paris  
<https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q1-2022>
- Peng Yen Liew et al., *Total Site Heat Integration planning and design for industrial, urban and renewable systems*, 2017
- Okazaki, T., Shirai, Y., Nakamura, T., 2015. *Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage*. *Renew. Energy* 83, 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.027>
- Rashid, K., Mostafa Safdarnejad, Seyed, Powell, Kody M., 2019a. *Process intensification of solar thermal power using hybridization, flexible heat integration, and real-time optimization*. *Chem. Eng.* 17.
- Solar-Payback, 2017. *Solar Heat for Industry*

P.S.: jeune doctorant cherche Professeur.E.s des Universités pour jury de thèse  
(rapporteurs déjà trouvés, date: ~15/12/2022, au Bourget du Lac)

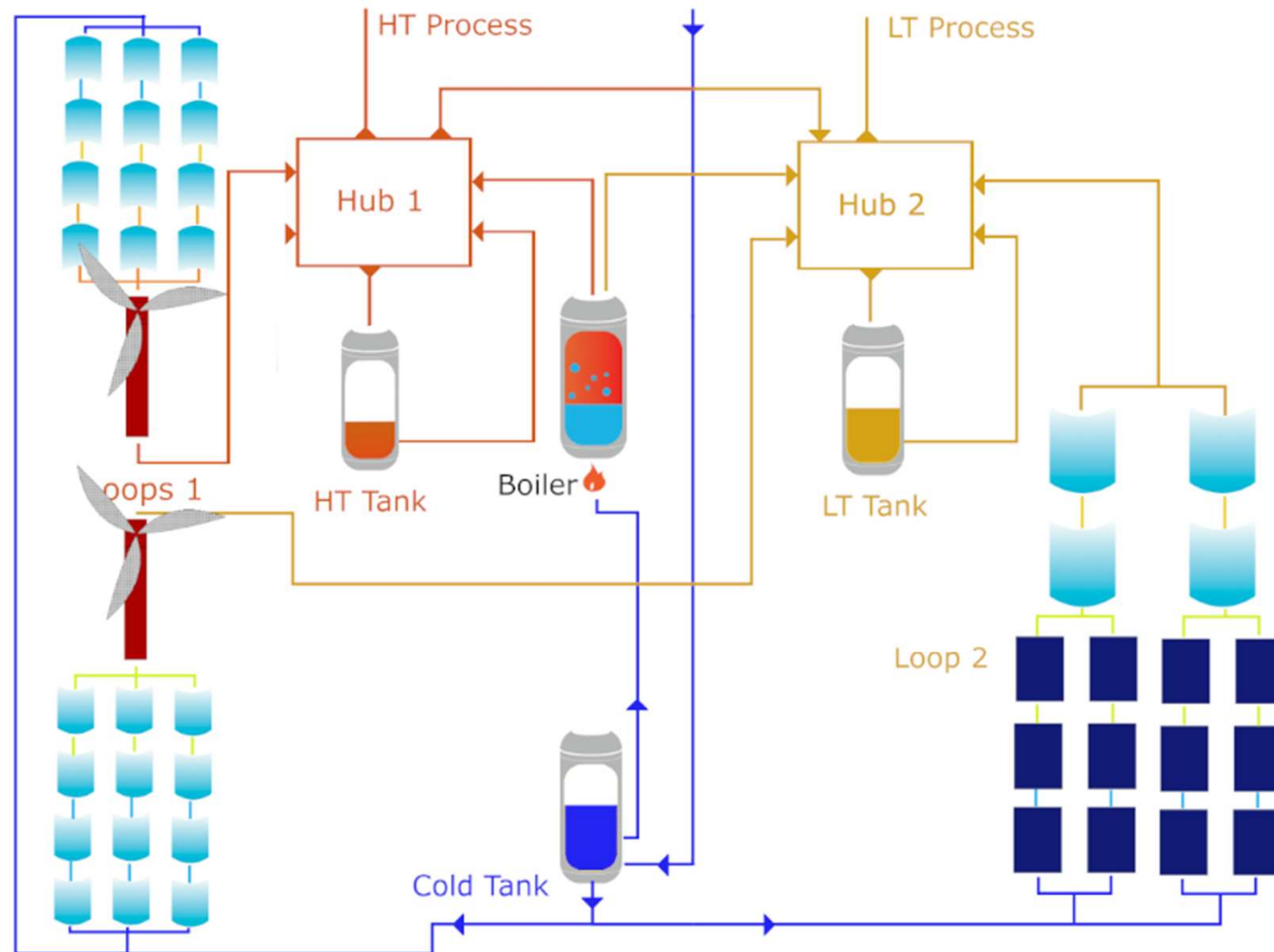
Hybridation avec de l'éolien pour la chaleur industrielle:  
Haute exergie => haute température

Complémentarité de la ressource

Intérêts probables:

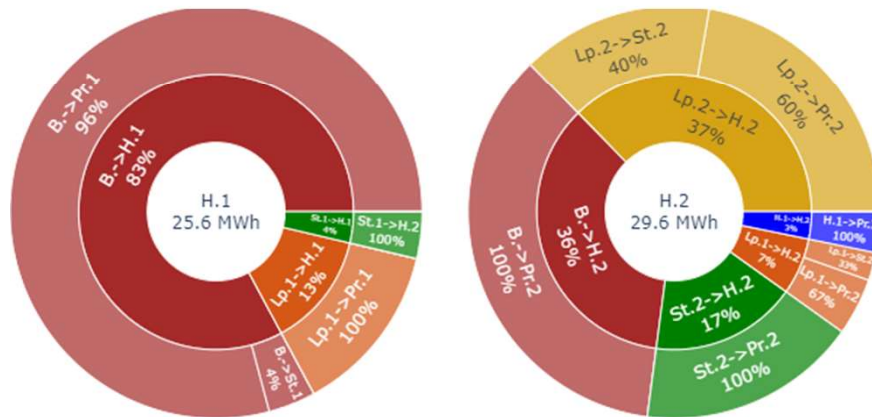
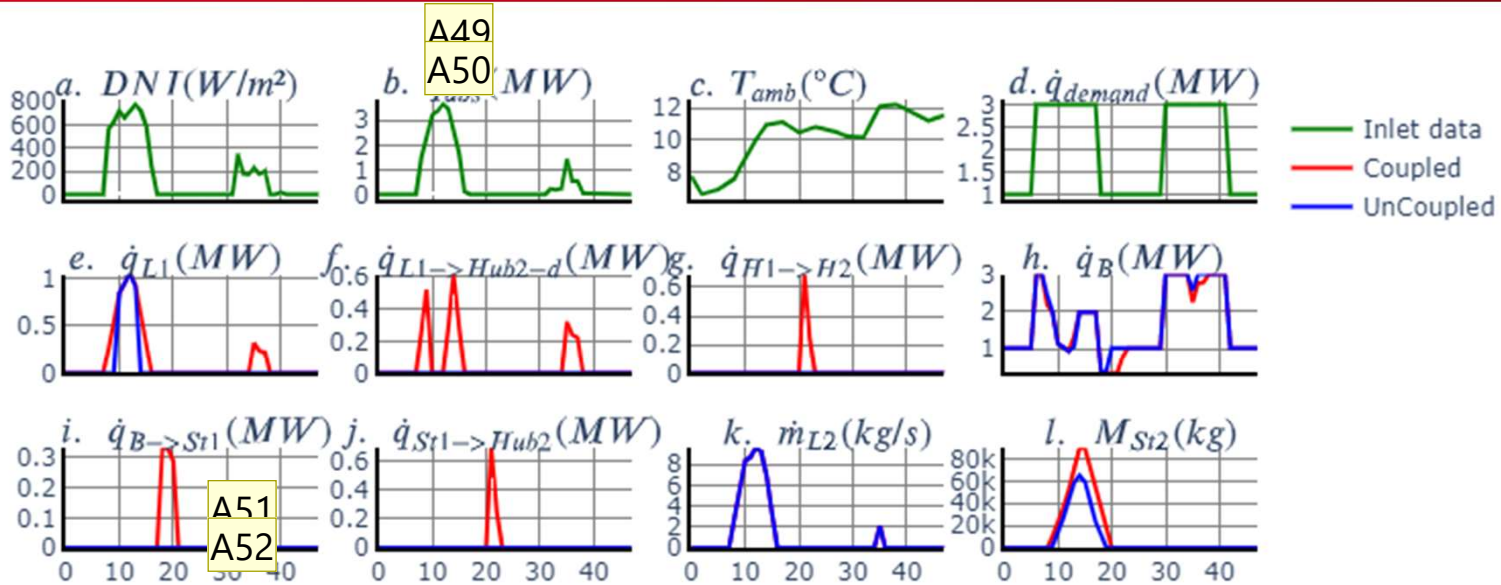
1. Meilleure tech-éco
2. Meilleure ACV
3. Meilleure acceptation sociétale (proche des sites industriels)
4. Meilleure disponibilité des matériaux

Source: Okazaki et al., 2015

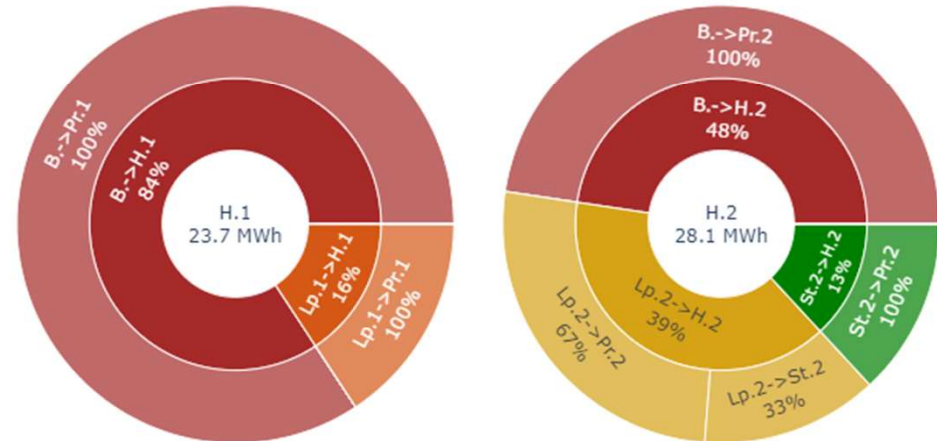


Résultats **sans engagements**: fraction renouvelable de 65%, avec 2 éoliennes de 3MW (SM 2.5). Pas de comparaison en puissance effectif fait pour l'instant.





Couplé



Découplé

## Diapositive 18

---

- A49**      Loop 1 tourne pour le Process 2 quand il ne peut pas tourner pour le Process 1  
*Auteur; 27/06/2022*
- A50**      On voit l'impact sur le deuxième jour!  
*Auteur; 28/06/2022*
- A51**      La chaudière préfère stocker dans le stockage 1 plutôt que tourner à + haut régime (trade-off entre les pertes du stockage et le rendement de la chaudière, ainsi que le coût de l'allumage).  
*Auteur; 27/06/2022*
- A52**      En plus, le stockage 2 est rempli car le Lp1 a participé, il vaut mieux stocker dans le stockage 1 qui n'est pas rempli encore  
*Auteur; 28/06/2022*

Usage de notebook Jupyter:

- > rendus élégants et pratiques, utiles pour l'enseignement
- > création de sites webs rapide via Jupyter Book
- > Utilisation de ipy\_widgets puis de traitlets pour faire des liens directionnels (choix du sous-composant dans le système, puis de la variable associée)

