

# Mise en place de modes Normaux et Réduits, gains énergétiques associés et développements futurs.

\*\*\*\*\*

Richard VALLIN

Sophie BOUCHOULE et Aristide LEMAITRE

AXIMA Concept

CNRS C2N

## Situé dans le cluster de recherche du plateau de Saclay (91)



**400**  
PERSONNES

**120**  
CHERCHEURS ET  
ENSEIGNANTS-CHERCHEURS

**80**  
INGÉNIEURS, TECHNICIENS  
ET ADMINISTRATIFS

**200**  
DOCTORANTS ET  
POST-DOCTORANTS

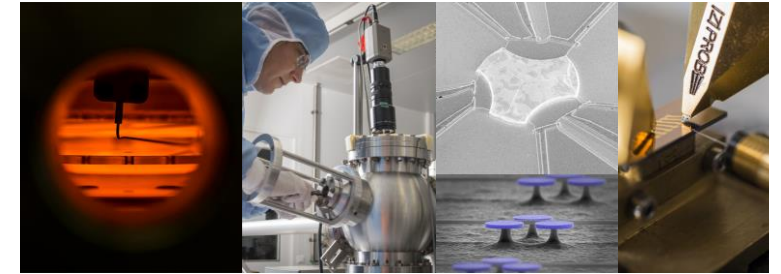
**35**  
NATIONALITES



**4**  
DÉPARTEMENTS DE  
RECHERCHE



**1**  
CENTRALE DE TECHNOLOGIE



PHOTONIQUE

NANOÉLECTRONIQUE

MATÉRIAUX

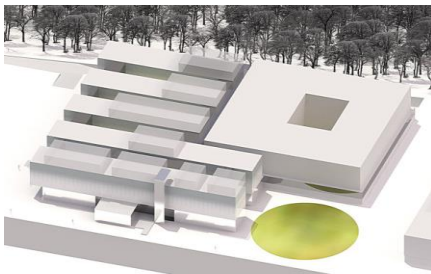
MICROSYSTÈMES ET  
MICROBIOFLUIDIQUE

Information et communication  
Numérique  
Conversion - récupération d'énergie  
Santé

www.c2n.universite-paris-saclay.fr



Photos: Sergio Grazia



- Semiconducteurs, oxydes fonctionnels, matériaux 2D, hybridation
- Photonique intégrée et quantique, photovoltaïque, optoélectronique MIR/THz
- Nanoélectronique, spintronique, transport quantique, circuits neuromorphiques.
- Microsystèmes, capteurs multiphysiques et biomédicaux.
- Micro-nanotechnologies. Grande centrale académique – réseau **RENATECH**.

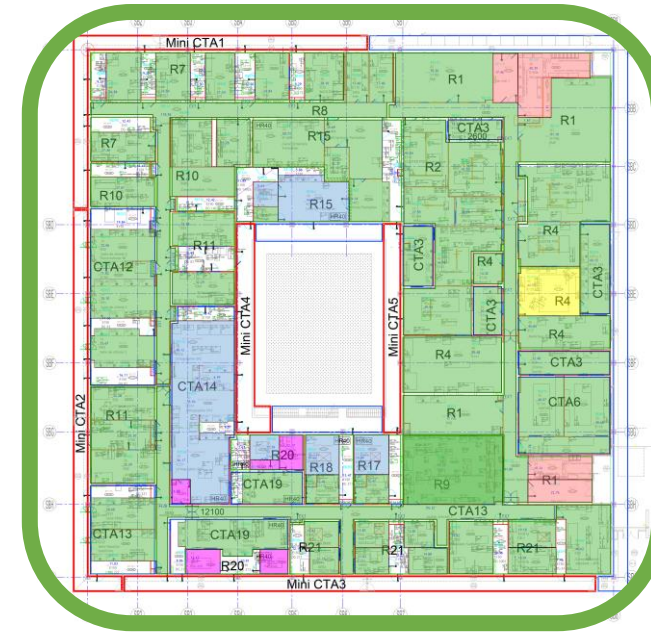
Total utile :  
18 000 m<sup>2</sup>

Tertiaire et laboratoires  
3 niveaux + 2 niv. techn.

Salle propre 2900 m<sup>2</sup>

95 salles d'expériences  
climatisées - 3000 m<sup>2</sup>  
+ serv. techn. - 500 m<sup>2</sup>

- **Salle Propre** : ISO 5 à 8  
**Contrôle** : P, T°C (20°C ± 1°C), HR (50% ± 10% ou 40 % ± 5%)



Empoussièremet  
contrôlé 7/7 -24/24

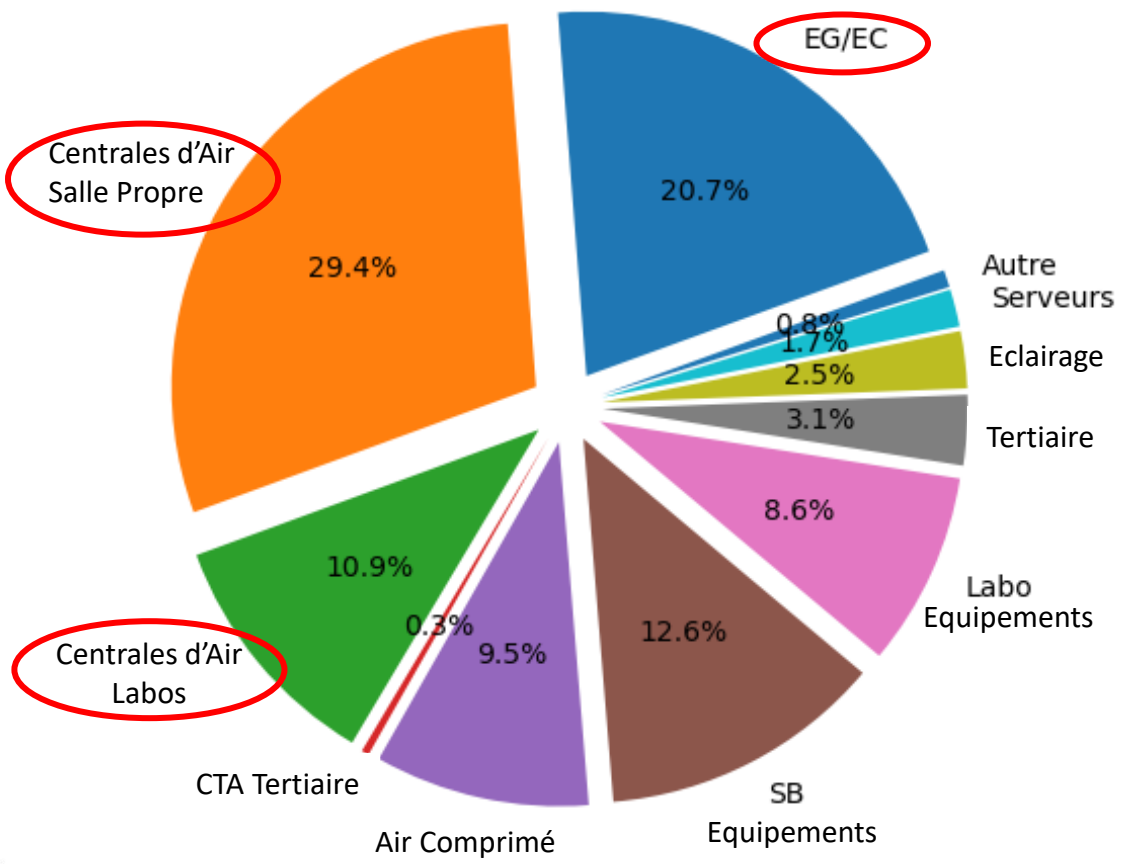
LEGENDE

	-15 Pa
	+10 Pa
	+15 Pa
	+20 Pa
	+30 Pa

- **Salles d'expériences climatisées** :  
**Contrôle** : surpression  
T°C (21°C ± 1°C), HR (50% ± 10)
- **Servitudes techniques refroidies**:  
**Contrôle** : T < 26°C

Répartition consommation électrique sur 12 mois (2022).

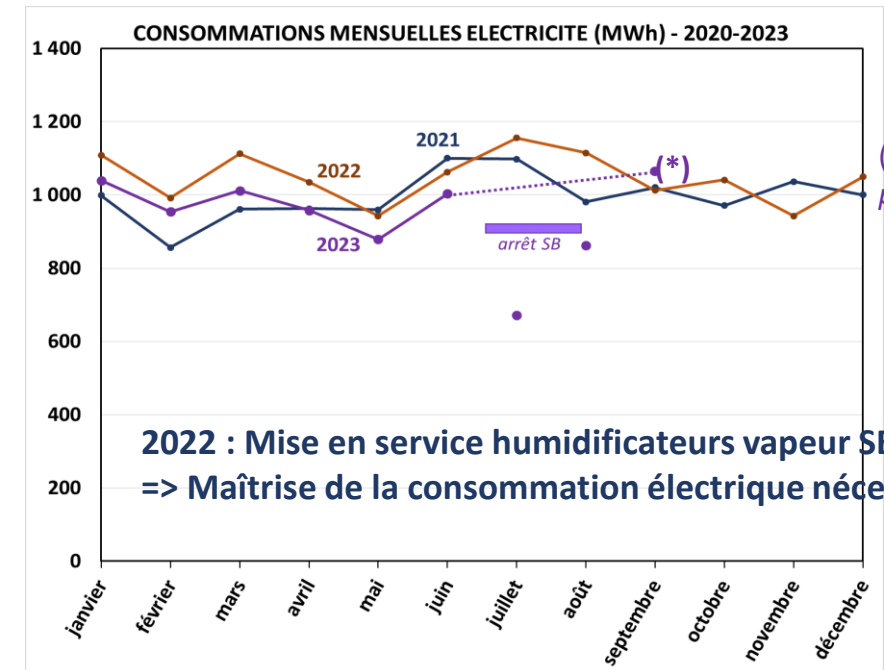
Production froid / chaud en majorité pour la CLIM SP et Labos



Consommation GAZ : production EC (hiver) – 2,3 MWh/an

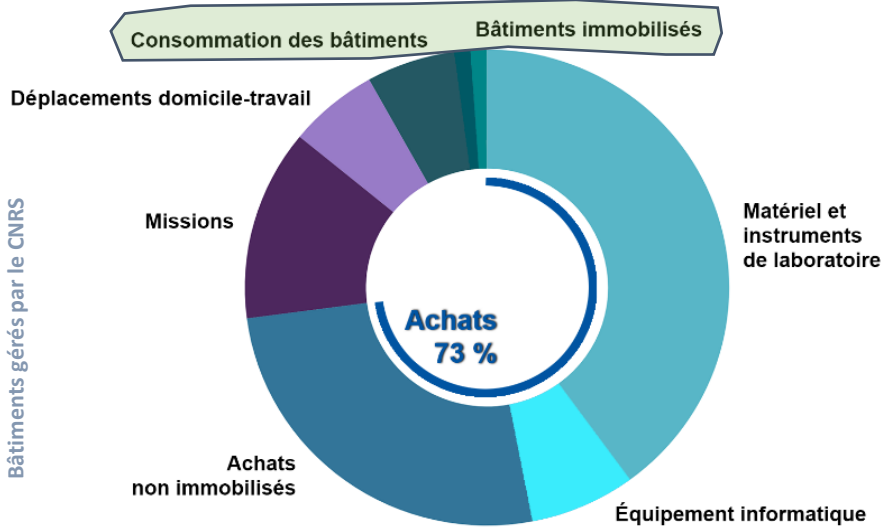
Consommation moyenne ELECTRICITE :

- 12 GWh/an
- ~50% pour la Climatisation - Salle Blanche et Labos
- Influence été/hiver faible : DESHU/HU.



2022 : Mise en service humidificateurs vapeur SB (900 kW)  
=> Maîtrise de la consommation électrique nécessaire.

## BILAN EMISSION GES CNRS - ANALYSE NATIONALE (2019)



1. Achats (matériel scientifique et informatique)

2. Missions et déplacements (avion : 90%)

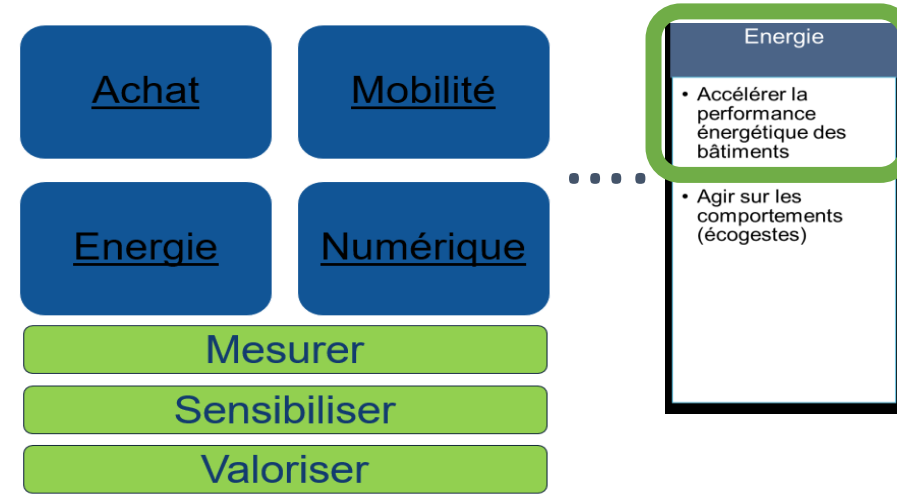
3. Consommation bâtiments (GAZ/ELEC : 90%)

14 t-équ. CO<sub>2</sub> annuel /agent (2019)

20 000 agents (C2N < 2%)

300 GWh consommés (C2N ~ 4,5%)

## PLAN DE TRANSITION BAS CARBONE DU CNRS

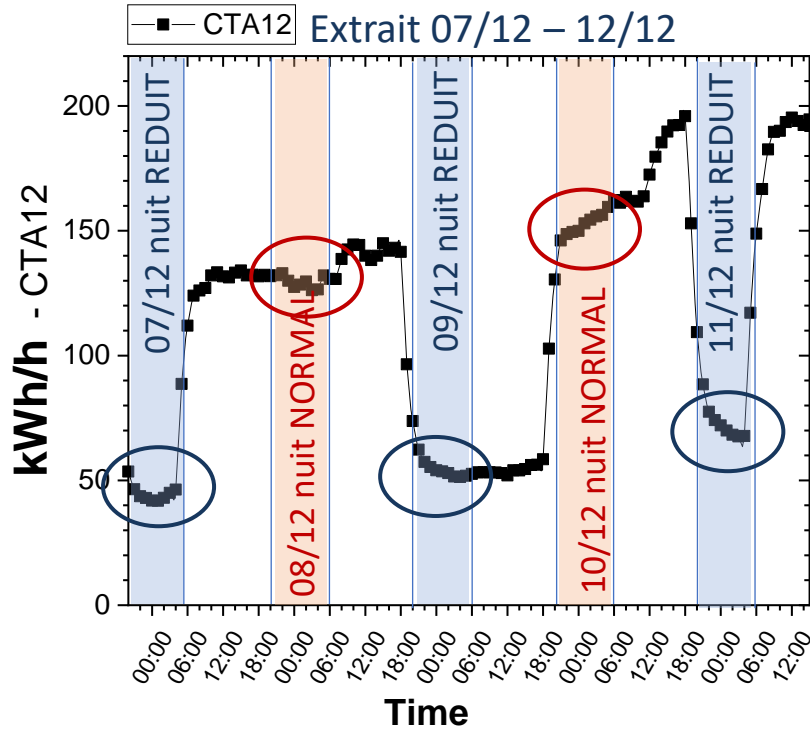


- Unités CNRS soumises au décret tertiaire
- 10% réduction consommation énergie 2024 / 2019
- 40% réduction en 2030-2035

**OBJECTIF du C2N : réduction de l'impact de la climatisation**

- => Mise en service d'un mode RÉDUIT en cas d'inoccupation
- => En salle propre (2022) – en Labos (2024)

Expérience hiver 2022 – Comparaison nuits « REDUIT » / « NORMAL » sur deux semaines



Salle Blanche – Centrale d’air neuf CTA12 (35 000 m<sup>3</sup>/h)

<b>kW MOYENN REDUIT :</b>		1 nuit sur deux du 05/12 au 16/12
SF	11,76	
HMD	60,72	
<b>TOTAL</b>	<b>72,48</b>	
<b>kW MOYEN NORMAL :</b>		1 nuit sur deux du 05/12 au 16/12
SF	33,92	
HMD	123,18	
<b>TOTAL</b>	<b>157,10</b>	
<b>Economies réduit/normal</b>		
		<b>54%</b>

**54% économies sur CTA12**

Humidification hiver

Expérience été 2023 – Même comparaison :

**62% économies sur CTA12**  
**56% économies moy. sur 9 systèmes**

En kWh annuels, rapporté à la durée du mode Normal/Réduit : **-10 à -15 % estimé sur consommation totale élec.**

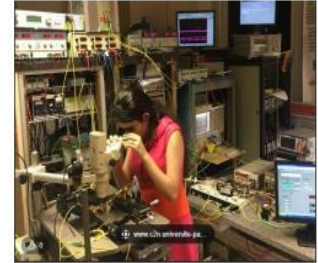
## Salles propres



- 17 systèmes classés de ISO 5 à ISO8
- 11 systèmes en recyclage
- 2 Ctas air neuf prétraité
- 6 systèmes en tout air neuf
- Débit d'air total 440 000 m<sup>3</sup>/h

## Laboratoires

- 6 CTA en tout air neuf (T°C, HR)
- 45 systèmes de recyclage (mini-CTA)
- Débit d'air neuf total 70 000 m<sup>3</sup>/h



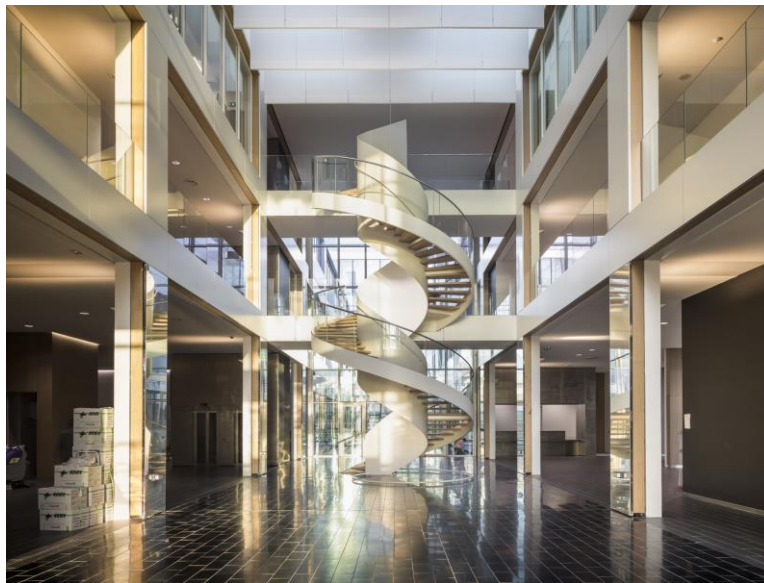
## Productions d'utilités

- 2,9 Mw EC avec 3 chaudières ou récupération sur GF – Eau entre 55 et 45 °C
- 3,4 Mw EG avec 4 groupes froid eau / eau – Eau à 5°C
- 700 Kw EG – Eau à 13 °C



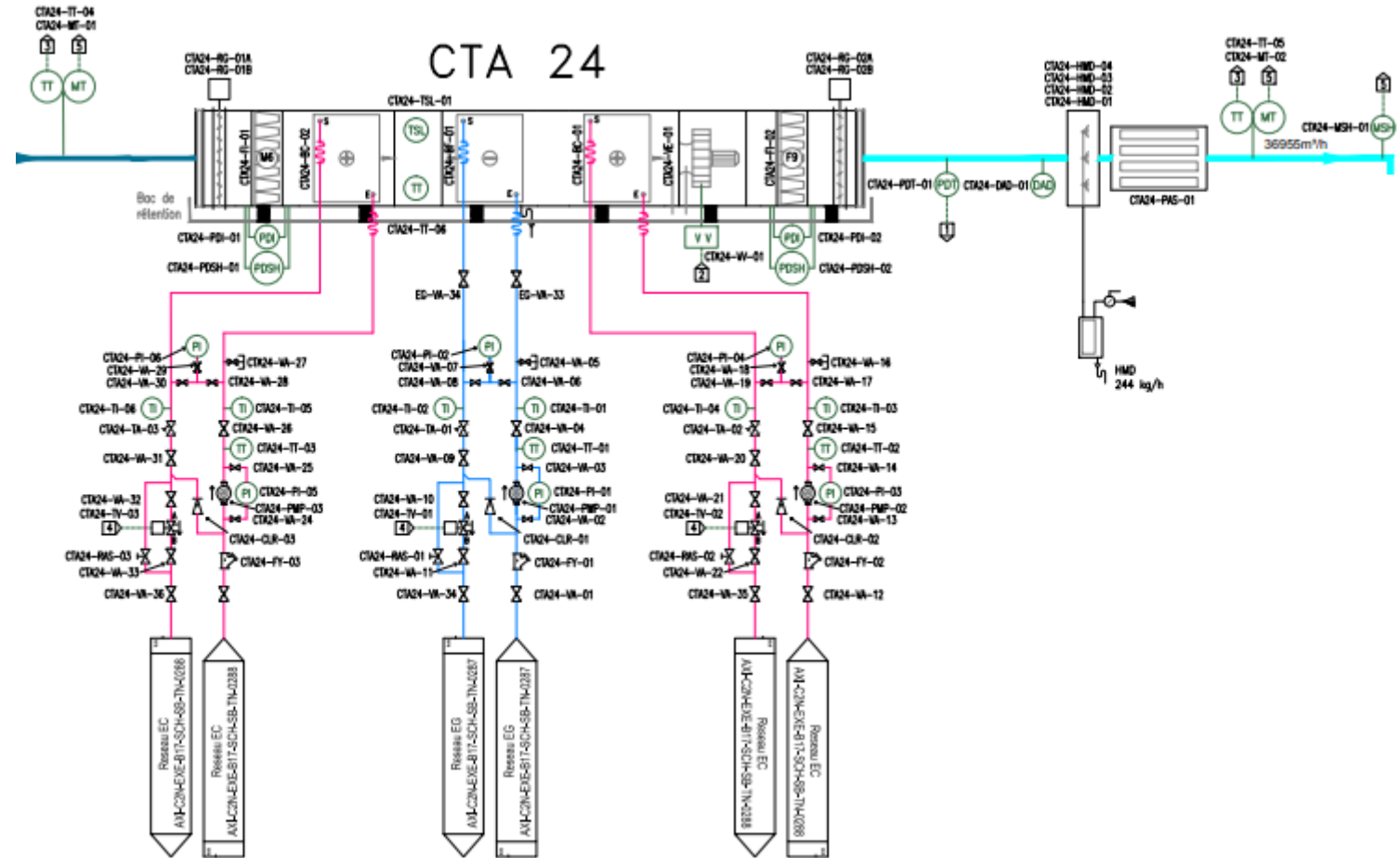
## Bureaux Tertiaire

- 8 CTA en tout air neuf (T°C)
- Débit d'air total 30 000 m<sup>3</sup>/h



# Présentation des CTAs Air neuf CTA 24 et 25

- Préparent air neuf pour 11 Recycleurs
- Débits variables sur régulation de pression en gaine
- Traitement toute l'année en Température et Hr
- Secours 100 % CTA Air neuf CTA 25

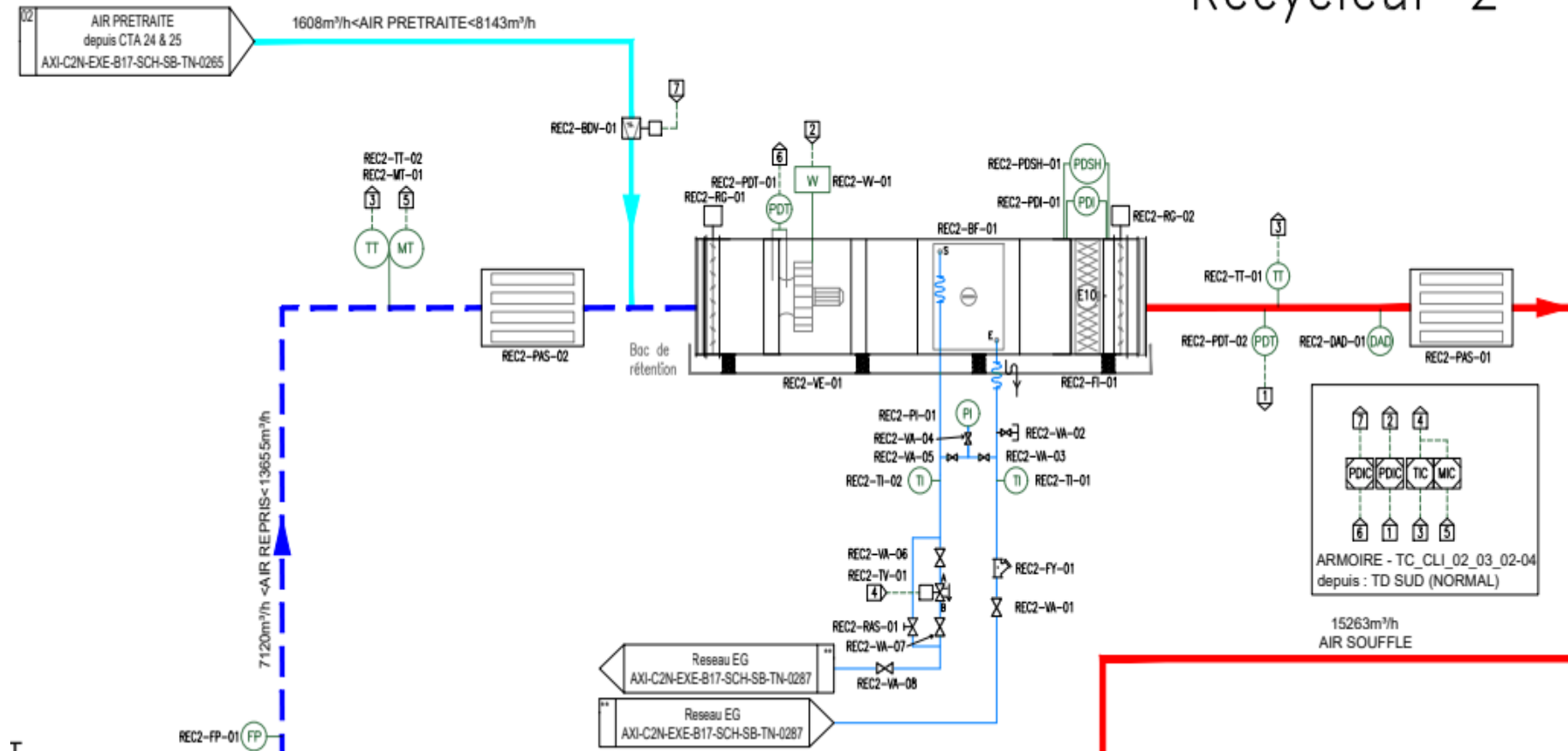




# Présentation des systèmes recycleurs d'air REC

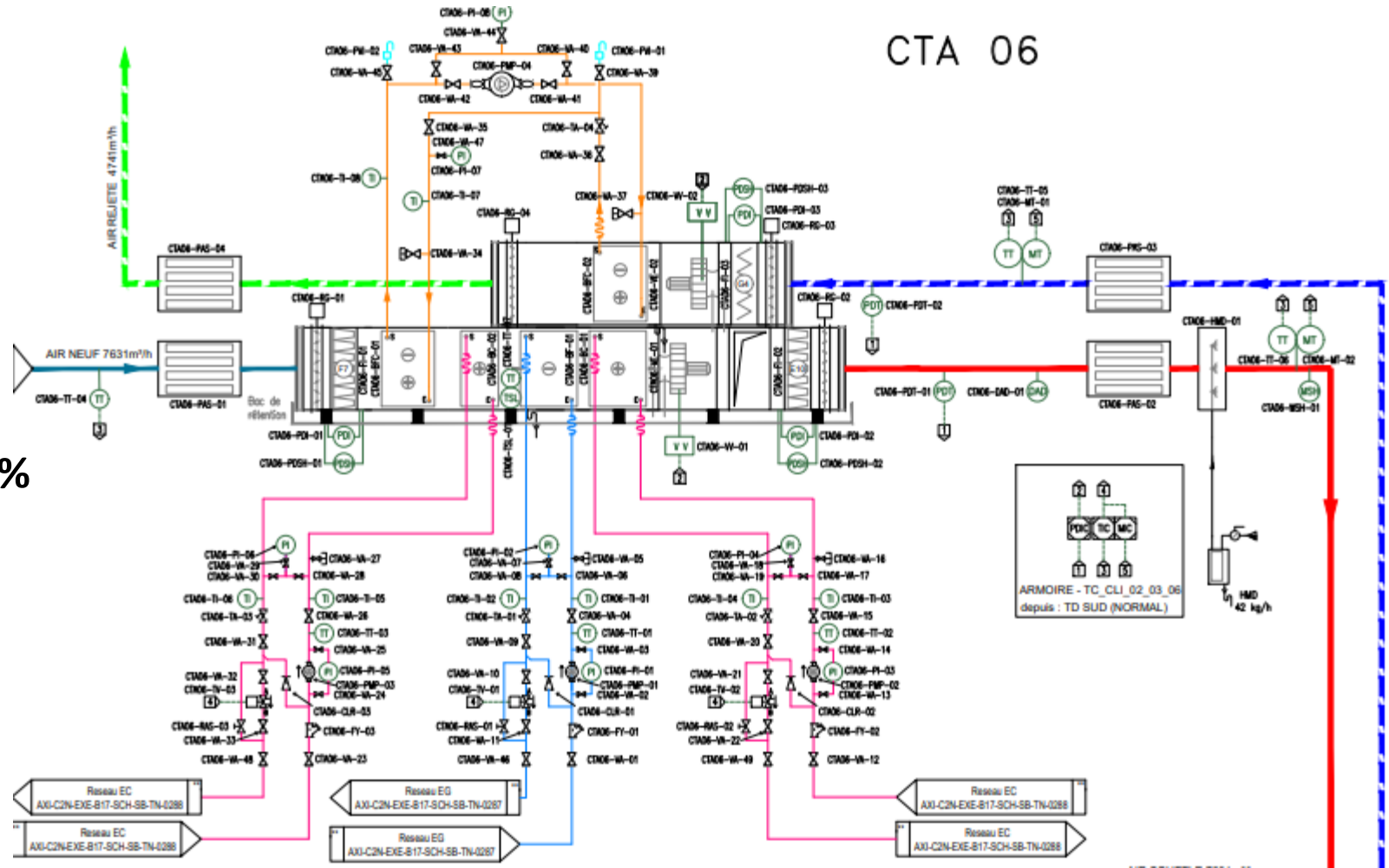
- Débit d'air neuf régulé / consommations en salles
- Débits variables sur régulation de pression en gaine
- Traitement toute l'année en Température

## Recycleur 2



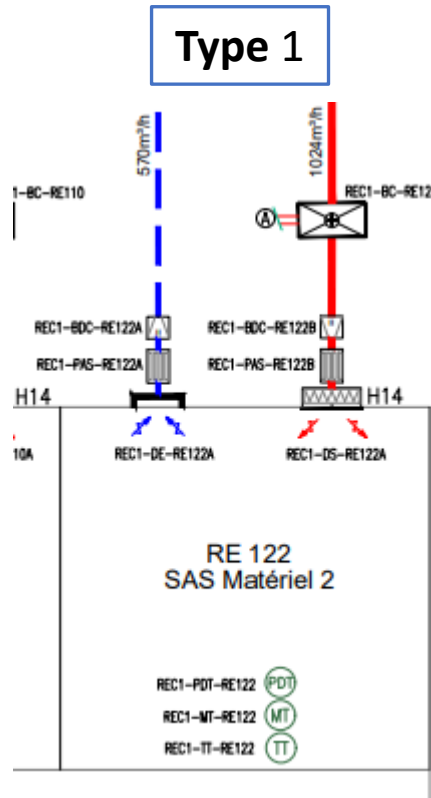
# Présentation des systèmes CTA (double flux)

- Débits variables sur régulation de pression en gaine au soufflage
- Débits variables sur régulation de pression en gaine en reprise
- Système de récupération par batterie Eglycolée efficacité 67 %
- Traitement toute l'année en Température et Hr

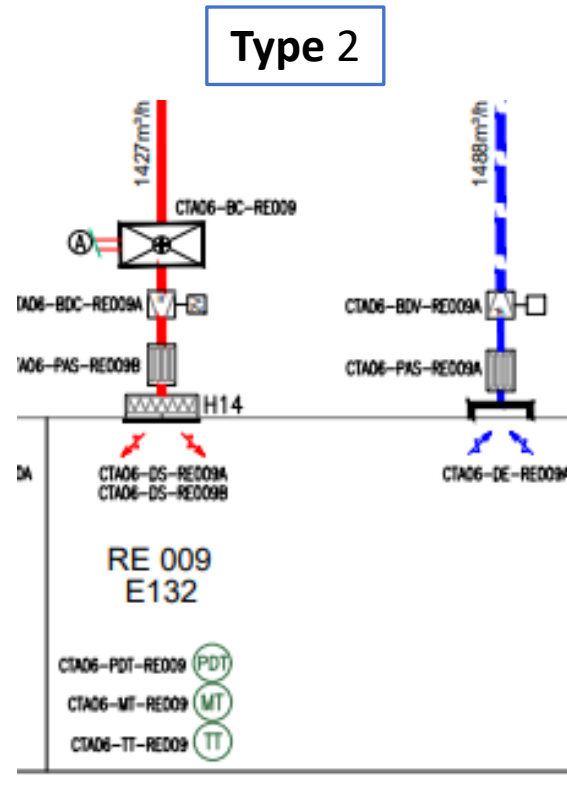


# Présentation de la diffusion en salles

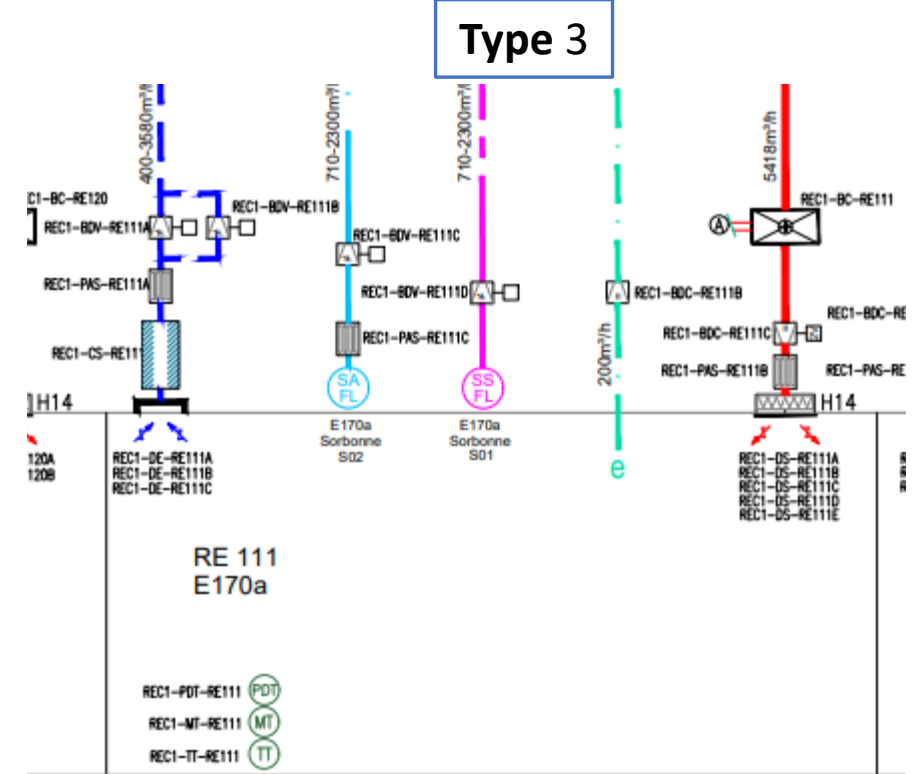
**Au C2N :**  
 Iso 8 Taux Brassage = 15  
 Iso 7 Taux de brassage 20 à 30  
 Iso 6 Taux de brassage = 40 à 60



Débits fixes



Débit constant  
 Normal/ Réduit **Soufflage et Reprise**



Débit constant Normal/ Réduit **Soufflage**  
 Débit variable Normal / Réduit **Reprise**  
 Débit variable reprise / Sorbonnes

# Présentation des outils :

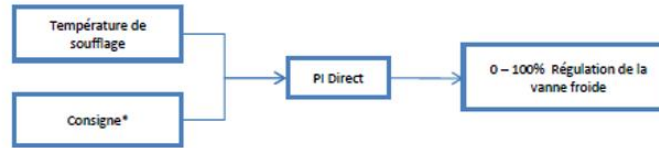
## Armoire électrique



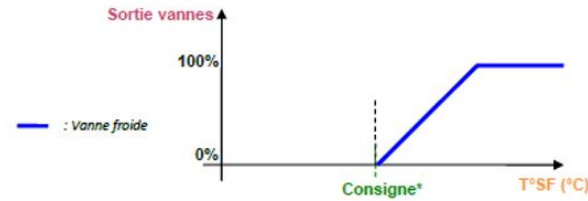
## Programme et AF



- La **vanne froide** est asservie par une boucle de régulation de type PI d'action Directe. Elle évolue suivant la température de soufflage et la consigne saisie par l'opérateur.



- La **régulation de température** peut donc être symbolisée de la manière suivante :

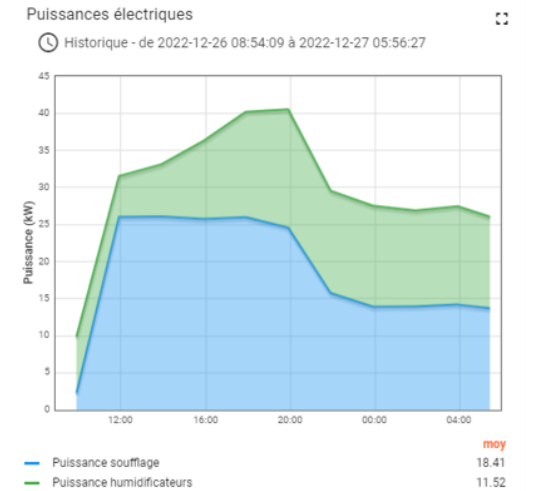
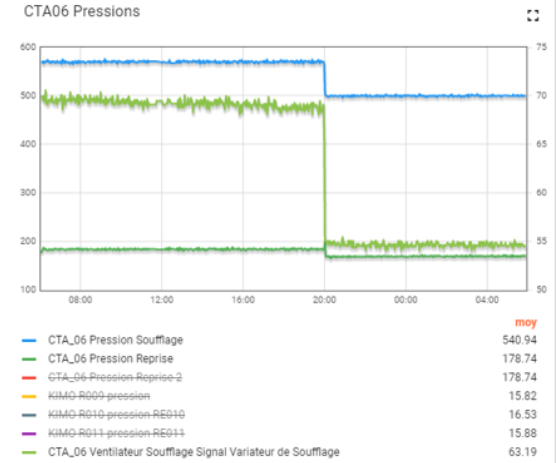


## Automates

## Capteurs / Actionneurs

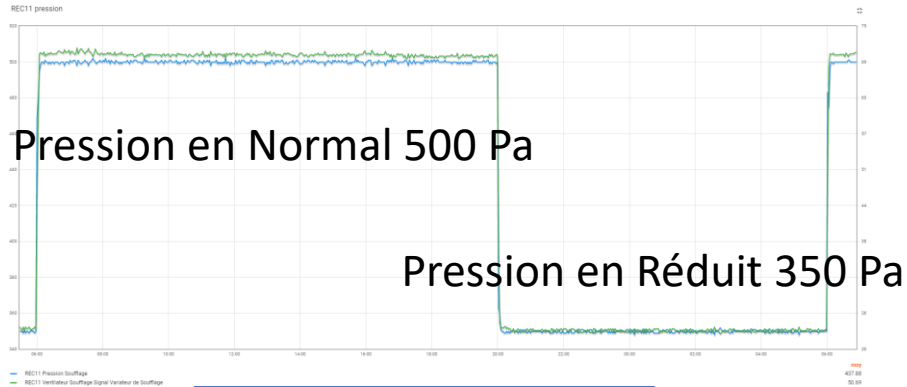


## GTC et pilote

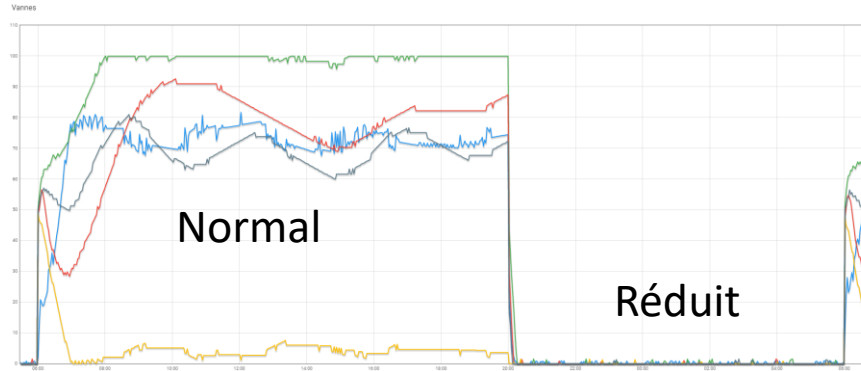


# Présentation des actions Normal / Réduit

## Régime Normal et Réduit : ROI très faible si prévu à la construction



P réseau soufflage



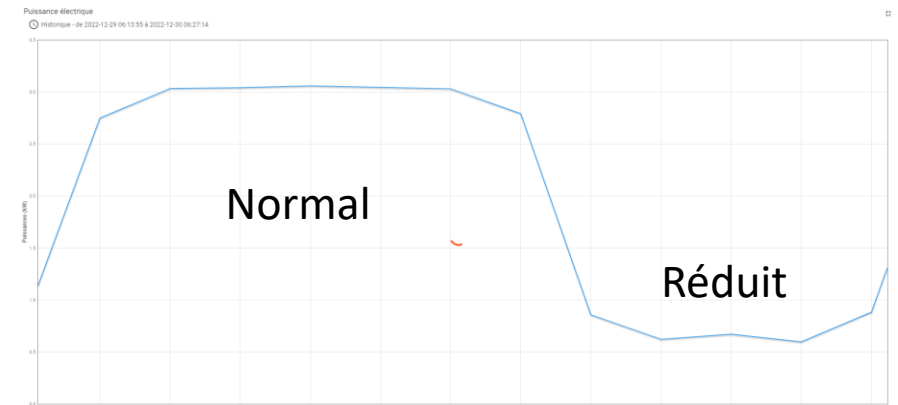
Vannes de régulation



- Réduits de 20h à 6h et Week-end
- 3514 h Normal
- 5246 h Réduit

### Au passage de normal à réduit :

- Basculement sur organes de régulation de débit
- Arrêt des extractions qui le permettent
- Diminution des consignes de pression en gaine
- Elargissement des T et Hr de régulation
- Pressions en salle constantes



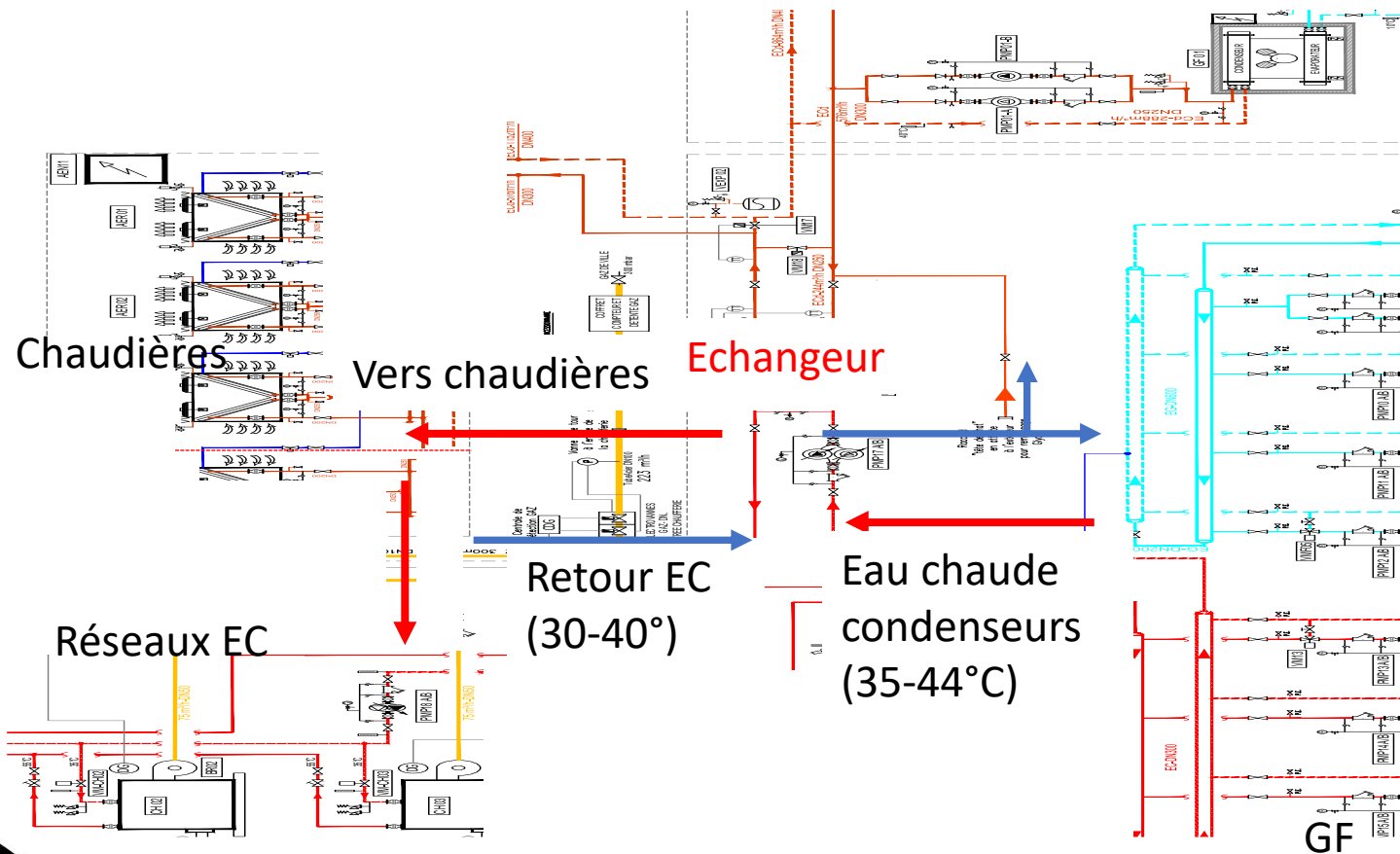
Puissance électrique

## ☐ Mesures :

- Ajout de compteurs tous fluides et leur supervision *Echangeur, humidificateurs, batteries EC/EG*
- Enrichissement de la plateforme de supervision *Open Source IoT*  

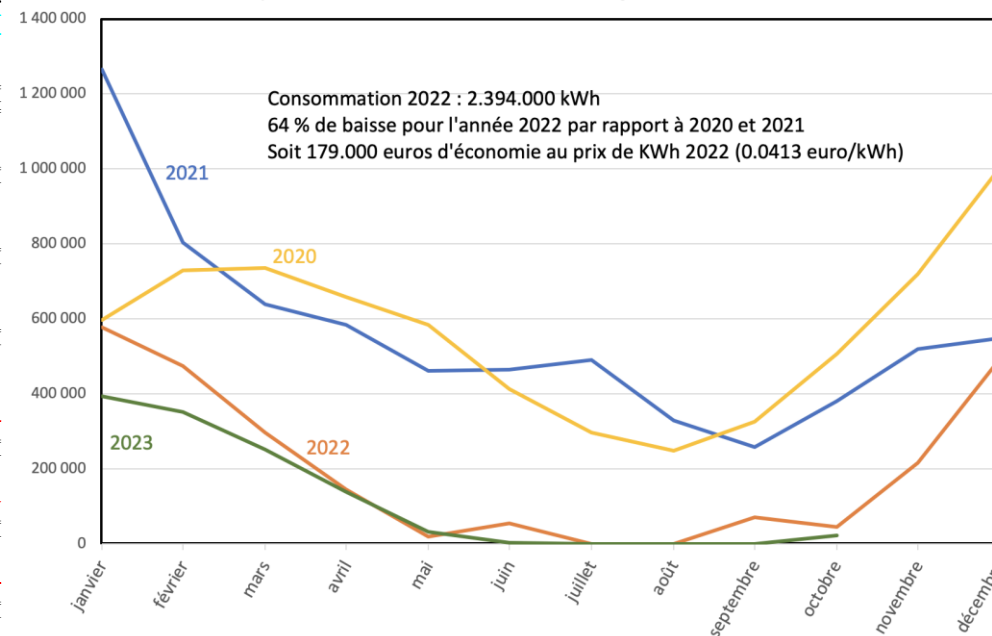
## ☐ Energie :

- **1/ Fixer la demande au plus près du besoin réel :**
  - Vérifier les consignes (soufflage, T°C, HR, seuils de régulation)
  - Etendre le mode REDUIT *2024 => Laboratoires*
- **2/ Réguler en temps réel à énergie consommée minimale :**
  - Adaptation dynamique des consignes (dans gamme de tolérance) minimisant la demande de chaud/froid
  - Extension globale => algorithmes d'apprentissage supervisé (I.A.)
- **3/ Récupérer la chaleur fatale :**
  - Optimisation de l'échangeur de chaleur (Groupes froids) - Contrôle du COP
  - Récupération calories/frigories de l'air extrait perdu *Sorbonnes, armoires ventilées, .. => CTA air neuf*
- **4/ Décarboner ?** *PV, géothermie ?*



## Impact sur la consommation de gaz

Comparaison consommations mensuelles de gaz en kWh 2020-23



Mise route de l'échangeur : septembre-décembre 2021

Loi de chauffe chaudière : mars 2022

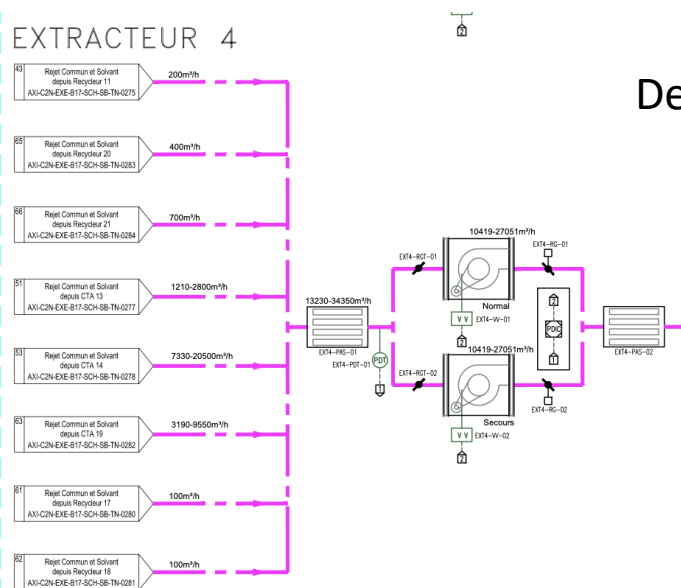
# Récupération de la chaleur fatale - Projet

Peut-on faire plus ?

On injecte 70.000 m<sup>3</sup>/h d'air neuf via 2 CTA, chauffé ou refroidi dans la salle blanche  
Air rejeté : fuites, sorbonnes, extractions -> calories /frigories perdues

## Récupération des calories ou des frigories sur l'air extrait par les extracteurs d'air (19)

En fait seuls les trois gros extracteurs d'air non corrosif



Deux solutions : - passive, des batteries de récupération  
- active par une pompe à chaleur

Récupération (extracteur)



CNRS LAAS  
Toulouse



**Actuellement** : consignes températures fixes à 21°C pour toutes les salles

## CTA et recycleurs communs

Une CTA ou un recycleur alimente plusieurs salles, jusqu'à 10

Or les salles n'ont pas les mêmes demandes chaud/froid

On refroidit pour la + forte demande

... et on chauffe toutes les autres !

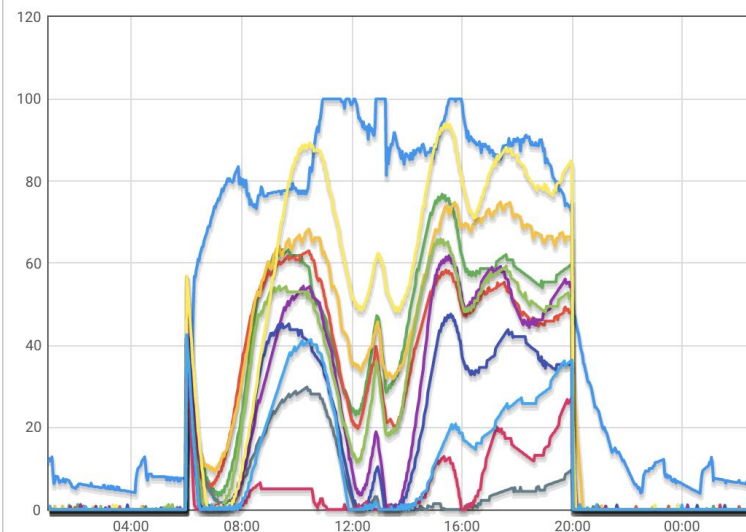
La solution : ajuster chaque consigne pour minimiser la chauffe

Tout en restant dans la gamme acceptable (20-22°C)

Mais optimisation statique impossible

les demandes évoluent au cours de la journée

Signaux de vannes chaudes et froides



	moy
REC21 Signal Vanne Froide	51.04
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE059	25.69
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE058b	22.84
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE058a	28.99
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE047	4.59
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE042	18.54
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE041	21.67
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE040	14.03
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE039	3.56
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE038	33.87
REC21 Signal Vanne Chaude Terminale RE037	9.09

## Ajustement dynamique des consignes

Codage d'un script python

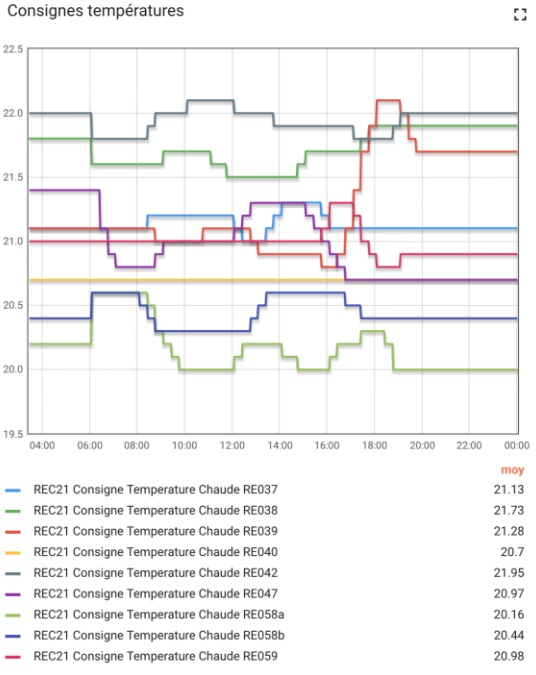
$V_{moy}$  = Moyenne vannes chaudes

Pour chaque pièce

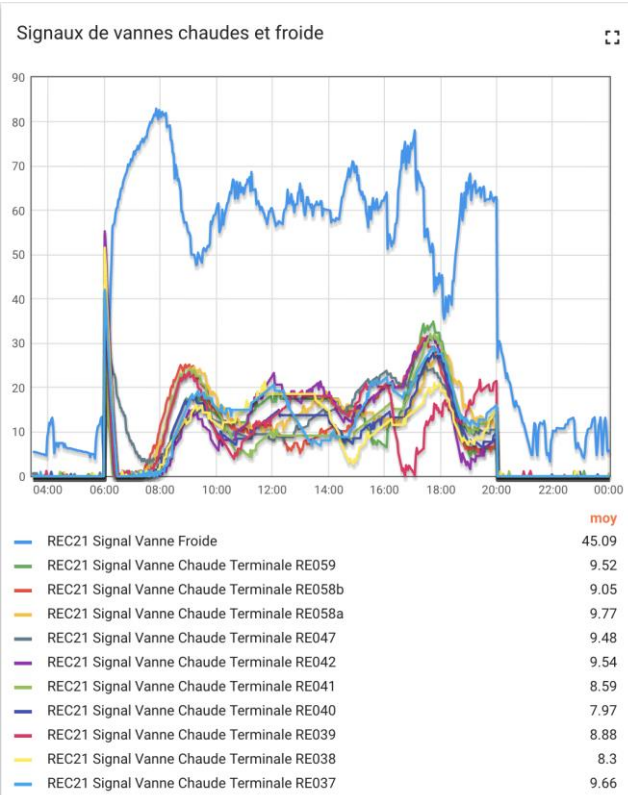
$$T_{cons}^{calc} = T_{cons}^{act} + p \times (V - V_{moy})$$

$20^{\circ}C < T_{cons}^{calc} < 22^{\circ}C$

Régulation vannes chaudes et froide par automate



## Gains froid et chaud



Ne pas se limiter à l'optimisation d'une CTA, mais du bâtiment dans son ensemble

Système complexe, avec plusieurs milliers de paramètres, souvent interdépendants

- températures, débits, pression circuits EC/EG
- débits d'air climatisé
- occupation / inoccupation, fréquentation
- météo extérieure, ensoleillement, humidité
- ...

Nécessité d'algorithmes plus puissants, prédictifs  
IA, apprentissage supervisé, logique floue...



#### Intelligence artificielle pour des salles blanches

Equans Digital a conçu et installé un système qui optimise la consommation énergétique des installations de refroidissement et de renouvellement de l'air sur le site de production d'un leader mondial français de la fabrication de semi-conducteurs, qui héberge notamment des salles blanches. Cette solution, qui repose sur l'intelligence artificielle, présente la particularité de recourir à plusieurs modèles d'algorithme plutôt qu'un seul. Elle permet ainsi d'optimiser les paramètres du système en fonction de la température extérieure et des demandes internes. Un gain d'énergie de 10 % à 15 % a été observé.

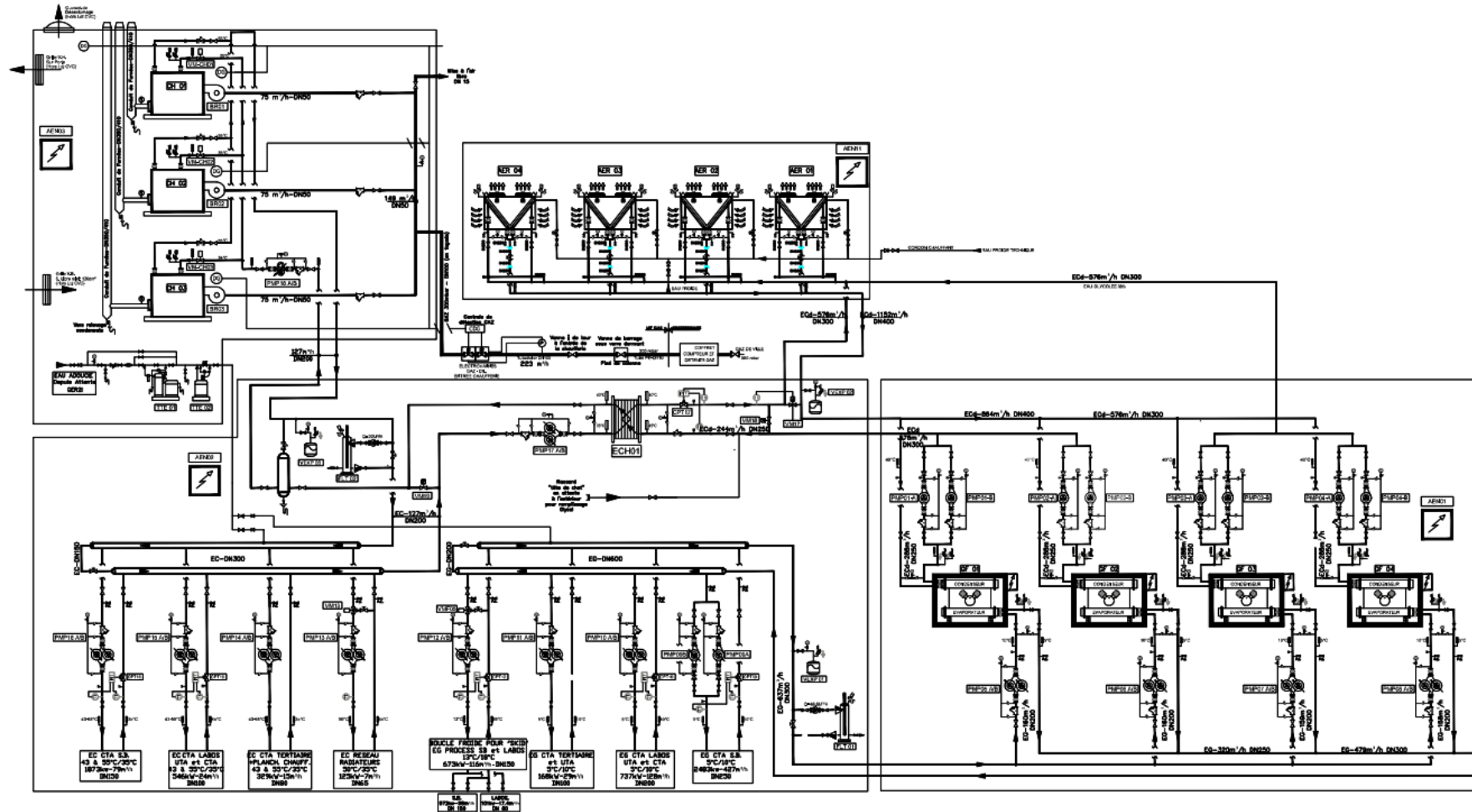
Juin 2023 - Direction de la Communication d'Equans



# BACK-UP

# La productions EC et EG

- Circuits hydrauliques primaires / secondaires
- Débits variables avec régulation sur vannes 2 voies équipées de limitation de débit maxi
- Récupération énergie sur groupes froid > 45 °C Régime mi-saison et été avec effacement des chaudières à



# Présentation des outils :

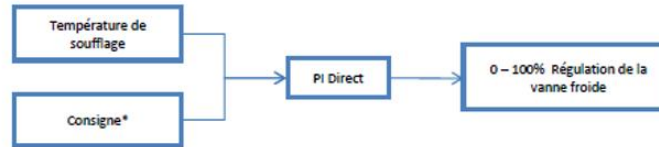
## Armoire électrique



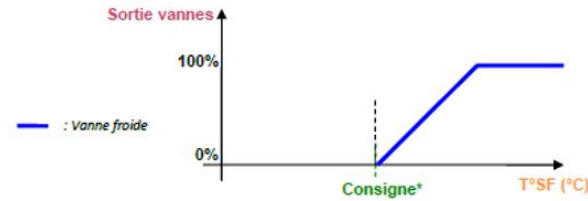
## Programme et AF



- La **vanne froide** est asservie par une boucle de régulation de type PI d'action Directe. Elle évolue suivant la température de soufflage et la consigne saisie par l'opérateur.



- La **régulation de température** peut donc être symbolisée de la manière suivante :

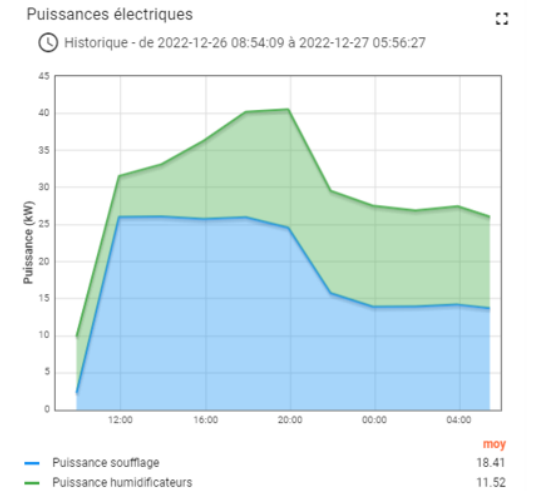
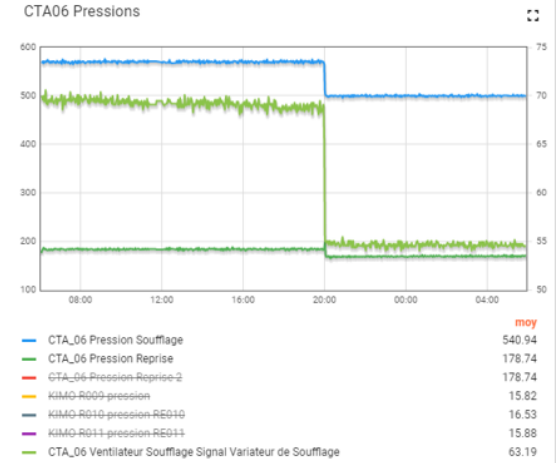


## Automates

## Capteurs / Actionneurs



## GTC et pilote



# Présentation des autres actions d'économies d'énergies

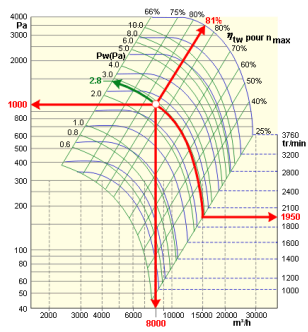
## Optimisation des points de consignes : ROI très faible

Pour une CTA de 20 000 m<sup>3</sup>/h



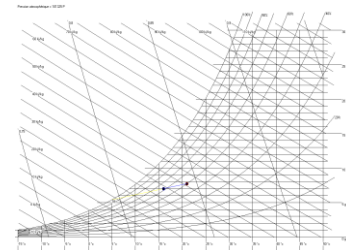
**-50 Pa sur la consigne d'un ventilateur**

**Gain de 0,74 Kwh soit  
6 482 Kw/an**



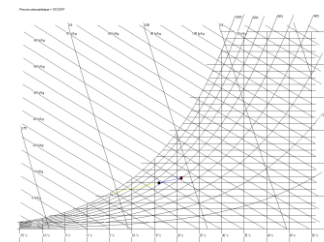
**T +1 °C en salle**

**Gain de 10 KW froid soit  
3,5 KWh sur GF soit  
30 700 Kw/an**



**Hr -10 % en salle en hiver**

**Gain de 37 L/h et 26 Kwh  
soit 53 m<sup>3</sup>/2 mois et  
37 000 Kw/2 mois**



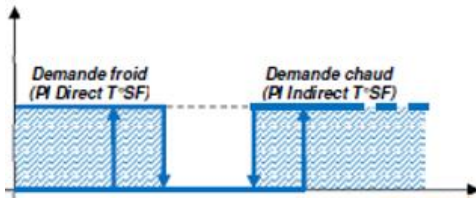
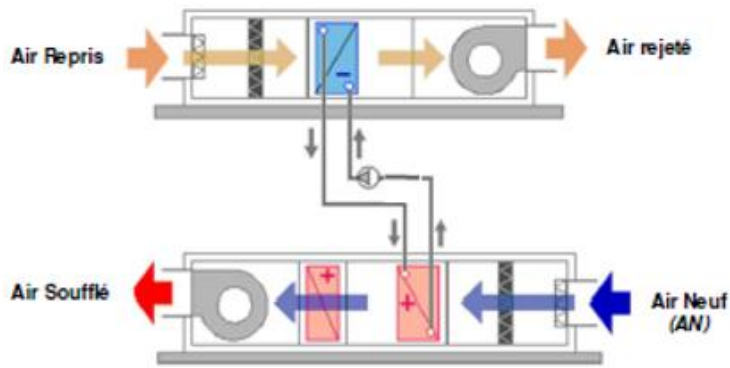


# Présentation des actions d'économies d'énergies

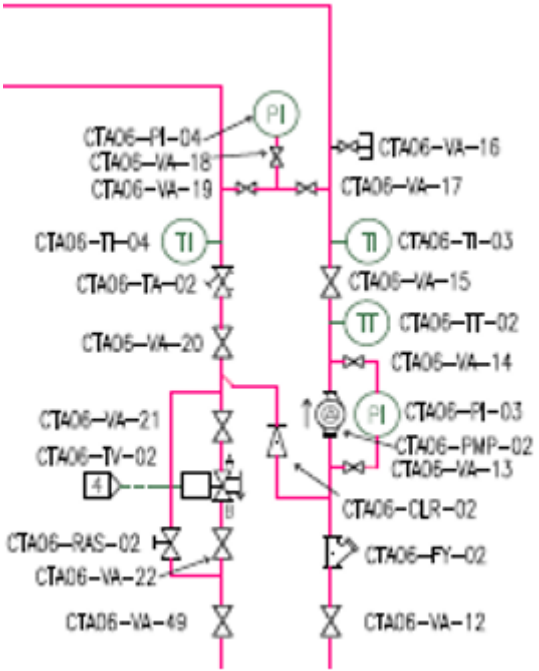
## Optimisation des boucles de régulation : ROI très faible



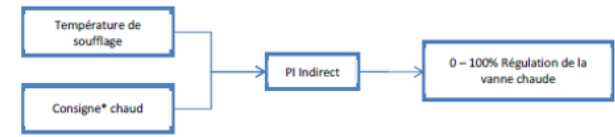
### Récupération



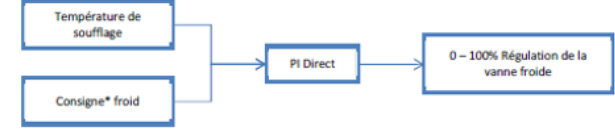
Enclenchement pompe si V2V > 5%



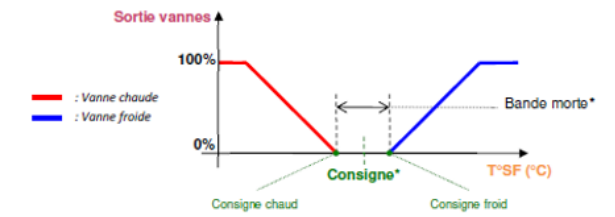
### Pilotage vannes CTA



La vanne froide est asservie par une boucle de régulation de type PI d'action Directe. Elle évolue suivant la température de soufflage et la consigne saisie par l'opérateur.



La régulation de température peut donc être symbolisée de la manière suivante :



En été correction T soufflage pour avoir une Vanne Batterie terminale < 50%

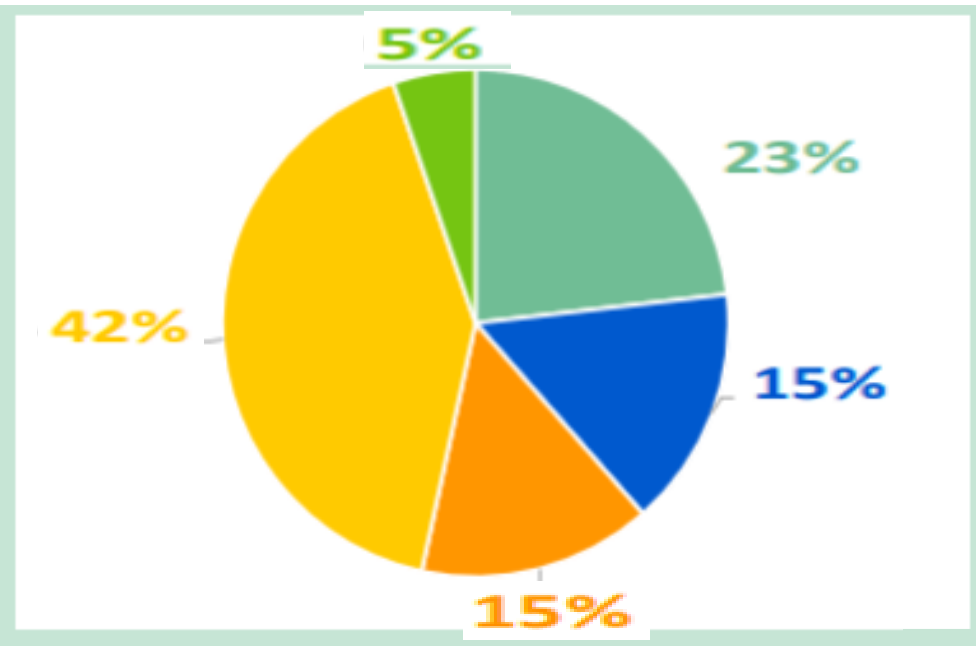
# Présentation des actions d'économies d'énergies

## Résultats :

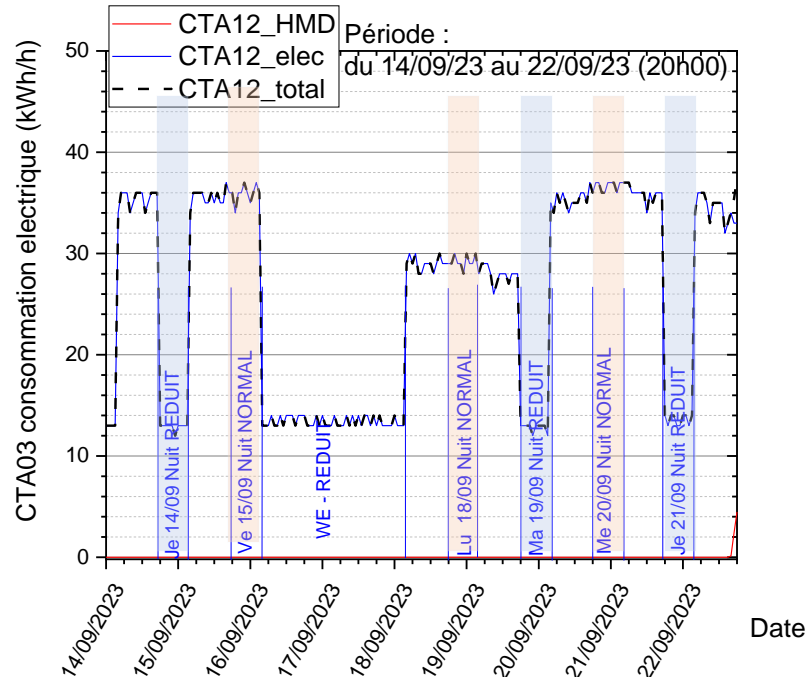


### Gains théoriques calculés

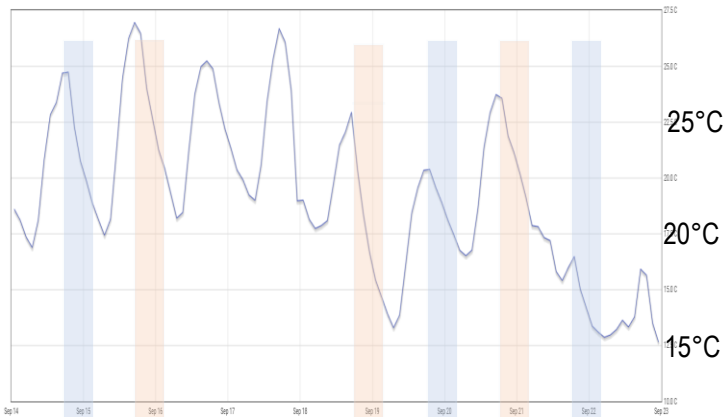
■ Gain sur diminution des débits réglés (Ventilateurs+Pompes)	23%
■ Gain sur batterie terminale	15%
■ Gain sur BF CTA ou recycleur	15%
■ Gains sur dérives T + HR sur systèmes étendus	42%
■ Humidificateurs	5%



# Expérience été 2023 – Comparaison nuits « REDUIT » / « NORMAL » sur deux semaines



Système	P <sub>moy</sub> NORMAL (kW)	P <sub>moy</sub> REDUIT (kW)	Réduction (%)
CTA03	22	10	-
CTA12	35	13	-62%
REC01+REC09	17	11	
REC02+REC04	14,5	8	
REC07+REC10	18,5	6,5	
REC21	11,5	3,5	
<b>Total</b>	<b>118,5</b>	<b>52</b>	<b>-56%</b>

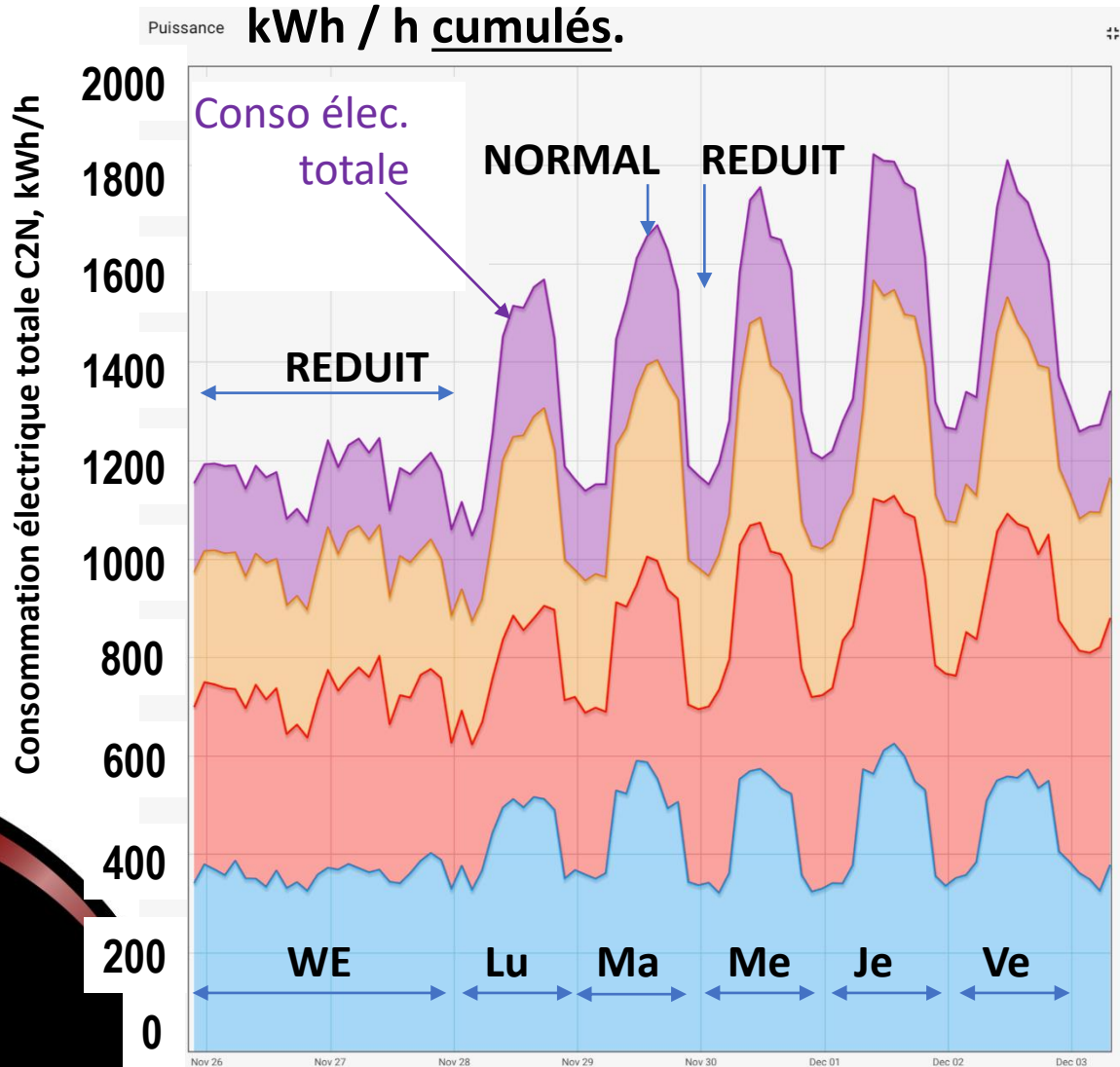


☐ Été : pas de demande HU

☐ Consommation élec. pour production de froid non incluse.

# Effet du Mode « REDUIT » - global

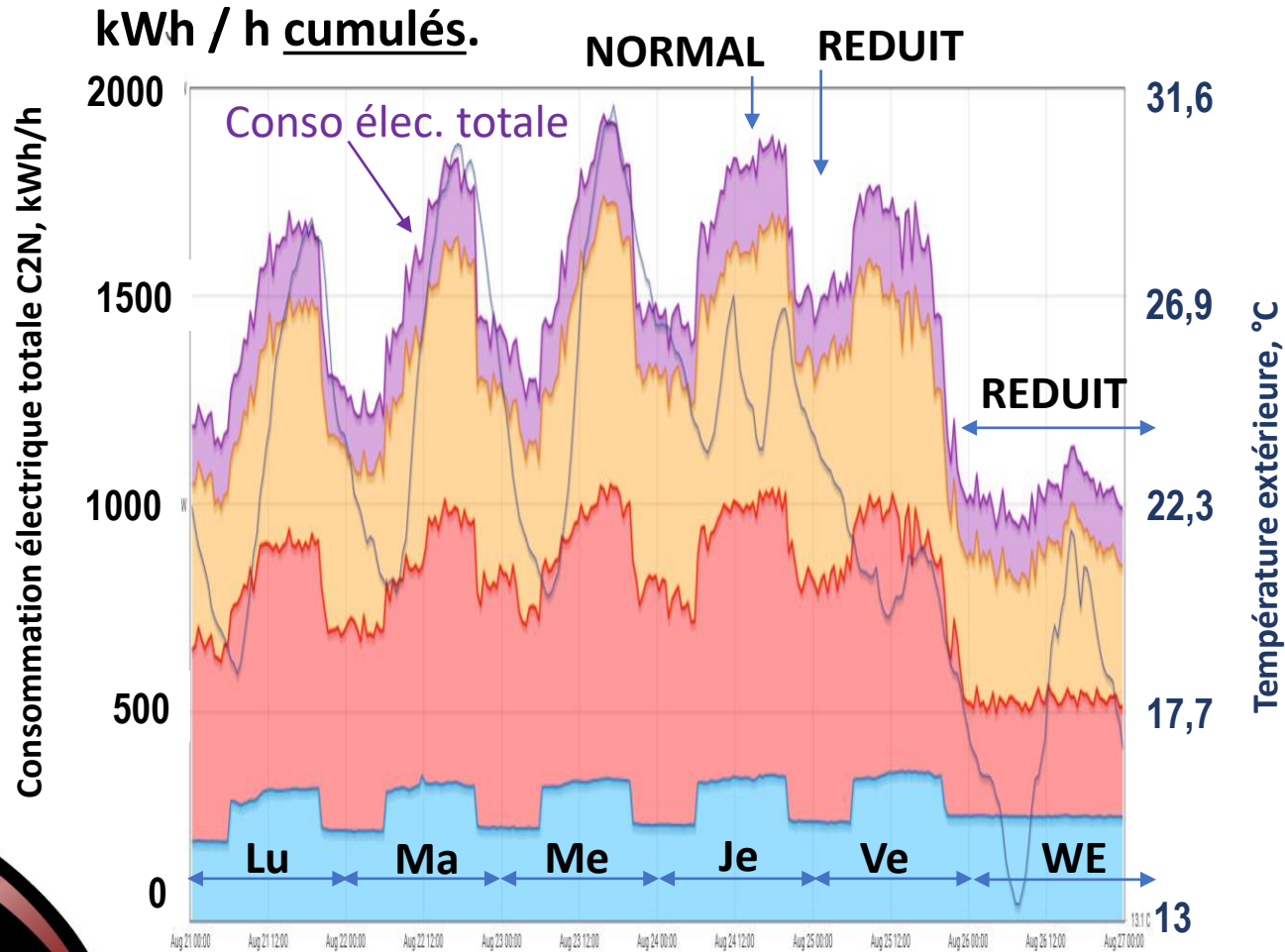
## ❑ Salle Blanche – Décembre 22 : Résultat sur la consommation électrique totale



### - Energie consommée :

- ❑ Puissance nuit / jour en kW moyen, sur un mois hiver : - 28%.
- ❑ En kWh, rapporté à la durée du mode REDUIT /NORMAL :  
Nuit (20h00 – 06h00) + WE.
- ❑ => **cohérent avec l'économie estimée d'énergie électrique (~15%)**
- ❑ **Réduit** : effets de la T°C extérieure + du mode REDUIT cumulés.

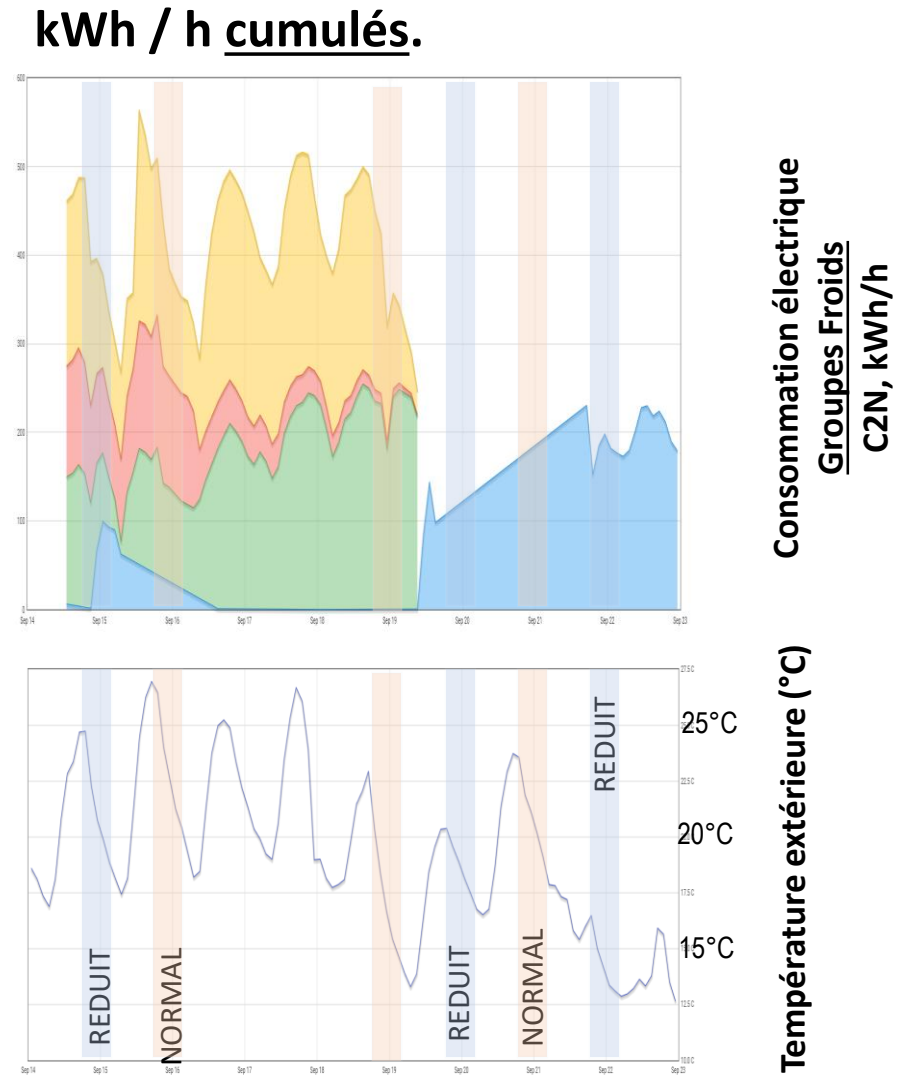
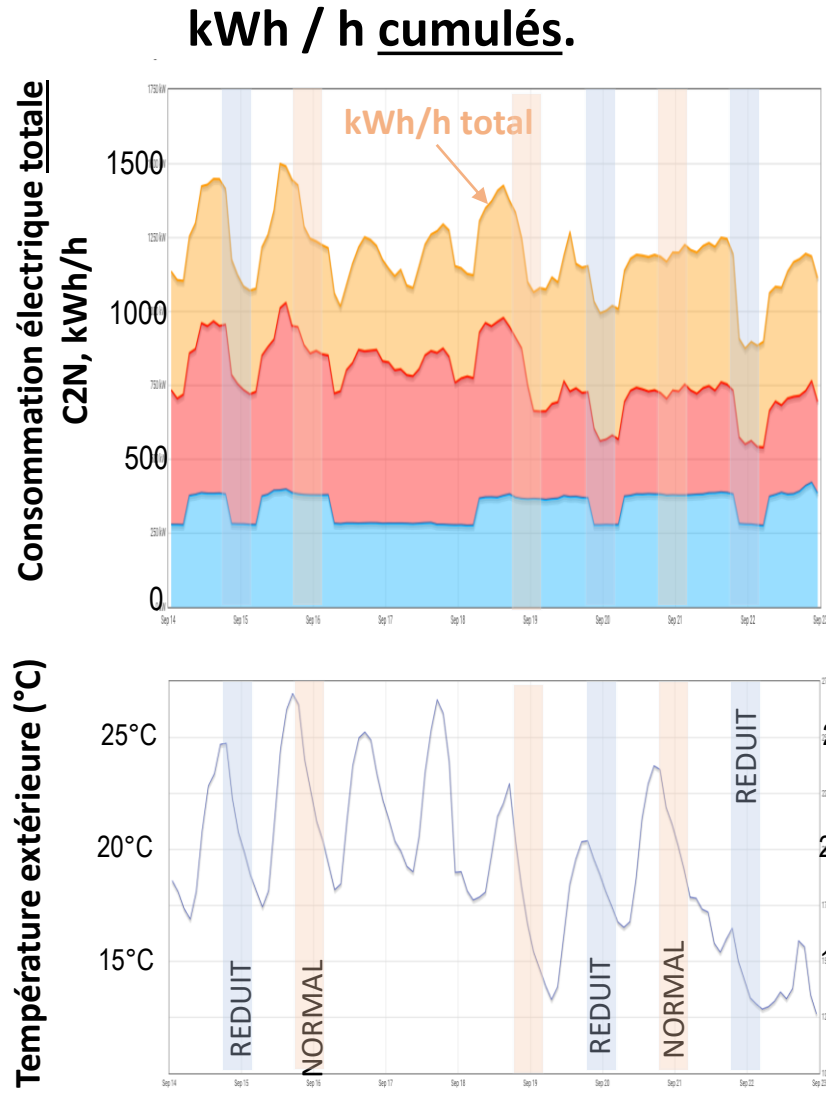
## □ Salle Blanche – Août 23 : Résultat sur la consommation électrique totale



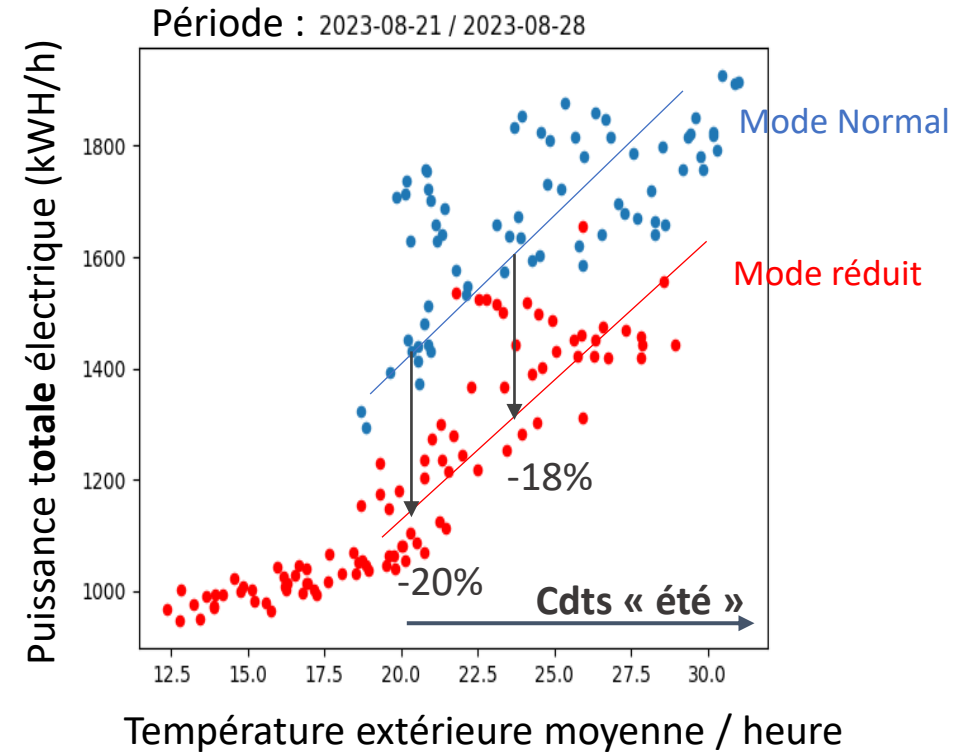
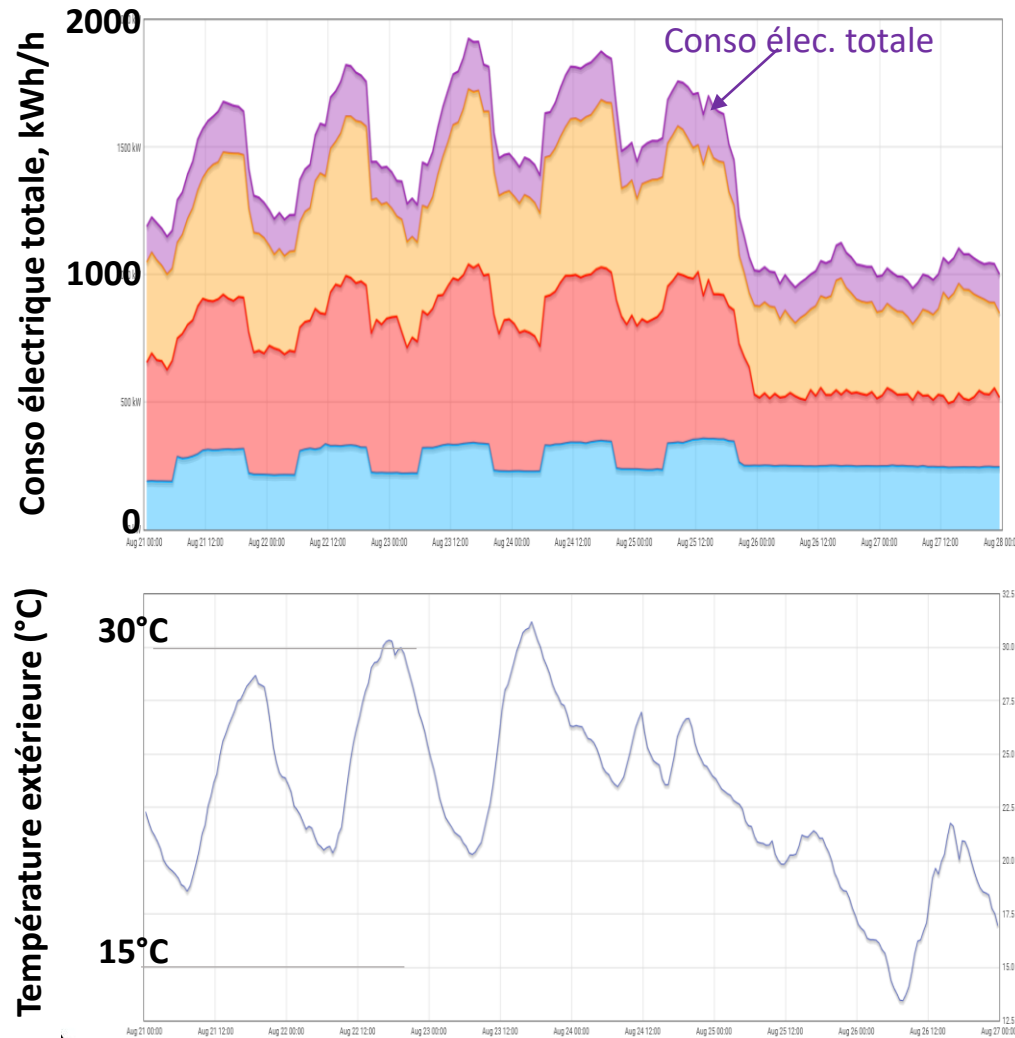
- Puissance électrique totale diminue en période « Réduit ».
- Mais puissance électrique totale consommée aussi corrélée à la T°C extérieure (axe Y – droite)
- **Différence effective entre NORMAL et REDUIT ?**  
=> à déterminer.
- (Période « été » choisie : demande HUMIDIFICATION = 0)

Période du 21/08 au 27/08/2023 (« été »).

Période du 14/09 au 23/09/2023 (été)  
 Corrélation avec la température extérieure



## □ Salle Blanche – été 23 : Résultat sur la consommation électrique totale

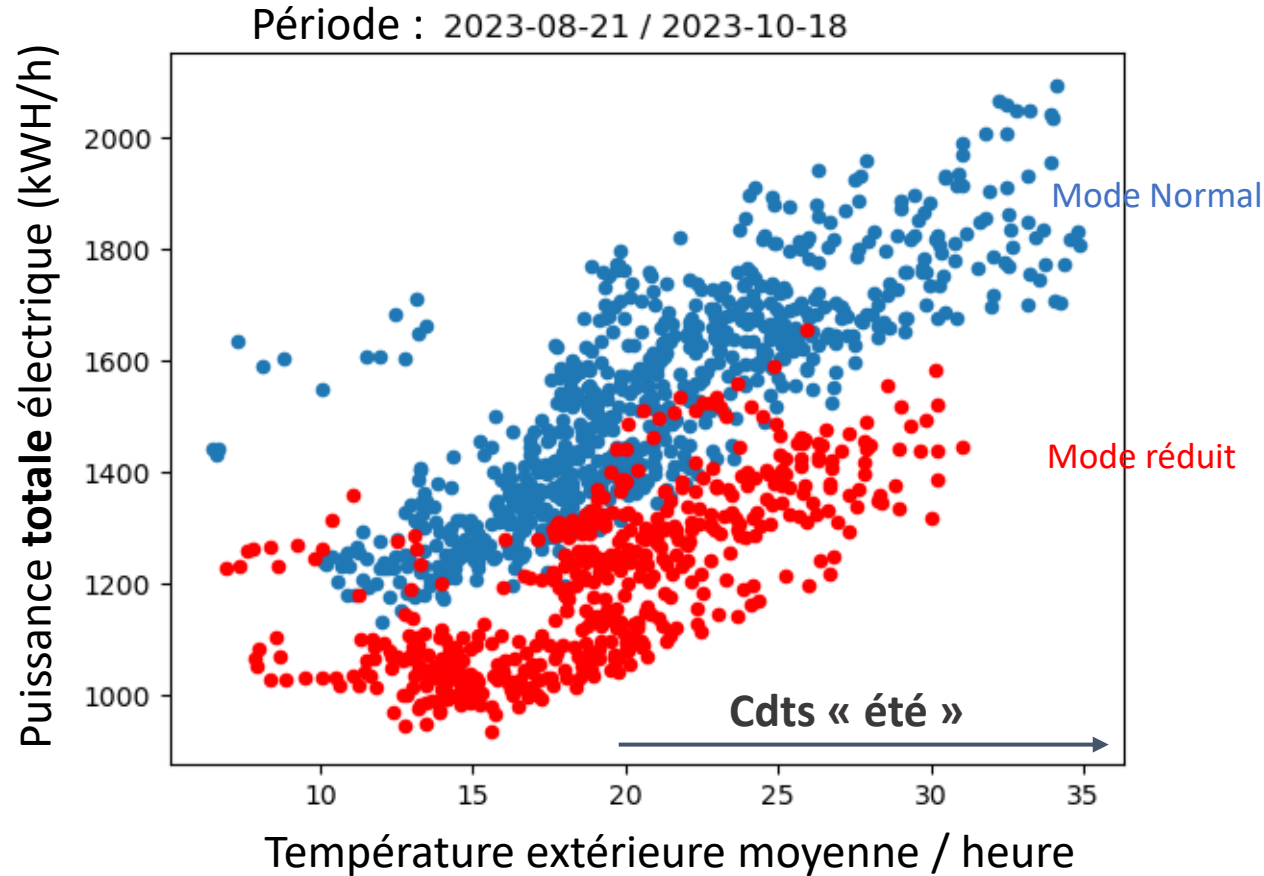


⇒ En kWh annuels, et ramené à la durée normal/réduit :  
-10% conso énergie élec. totale en kWh, en cdts « été »

Période du 21/08 au 27/08/2023 (été)

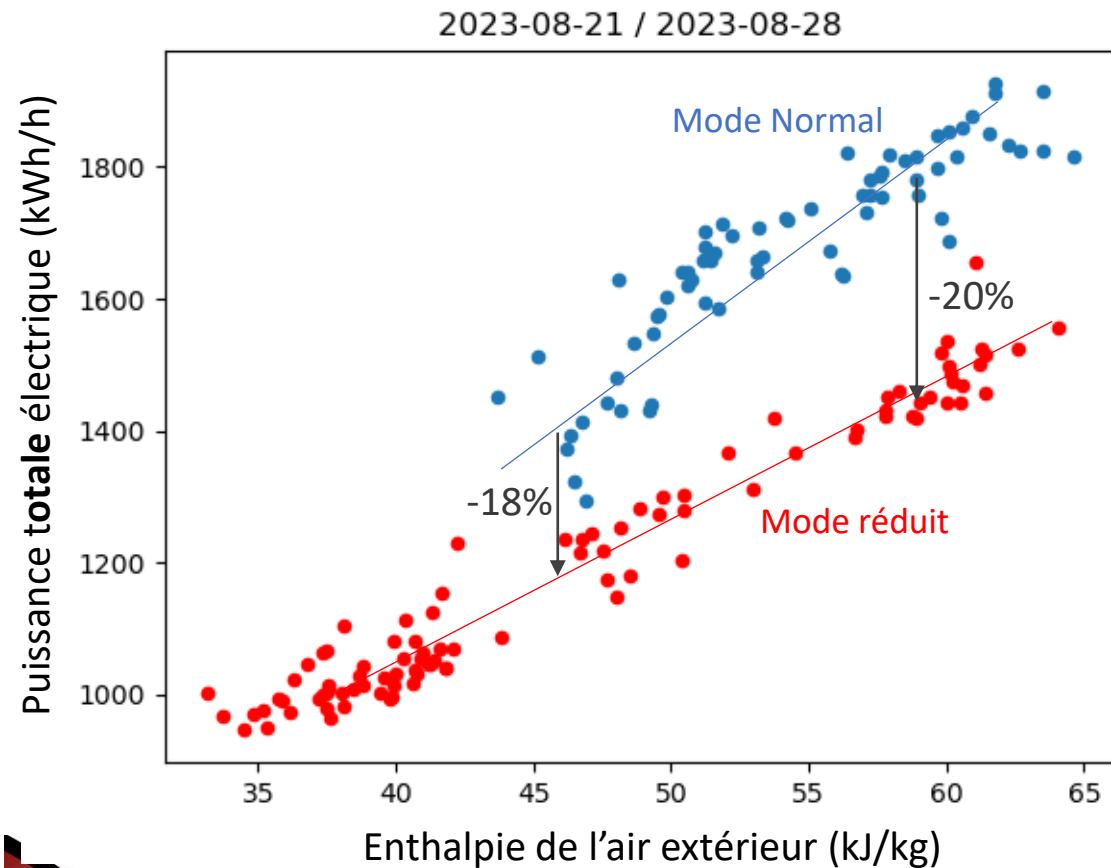
## □ Salle Blanche – « été 23 » : Résultat sur la consommation électrique totale

Période du 21/08 au 18/10/2023

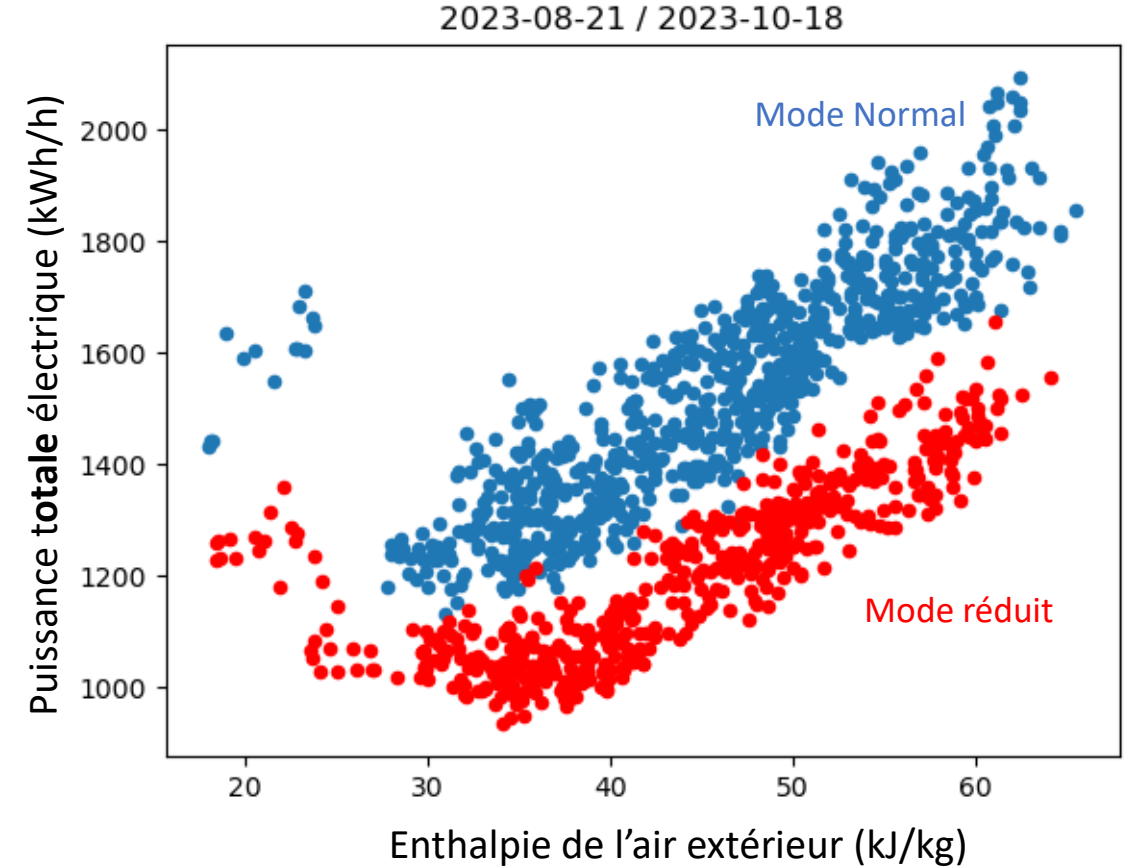




## □ Salle Blanche – été 23 : Résultat sur la consommation électrique totale



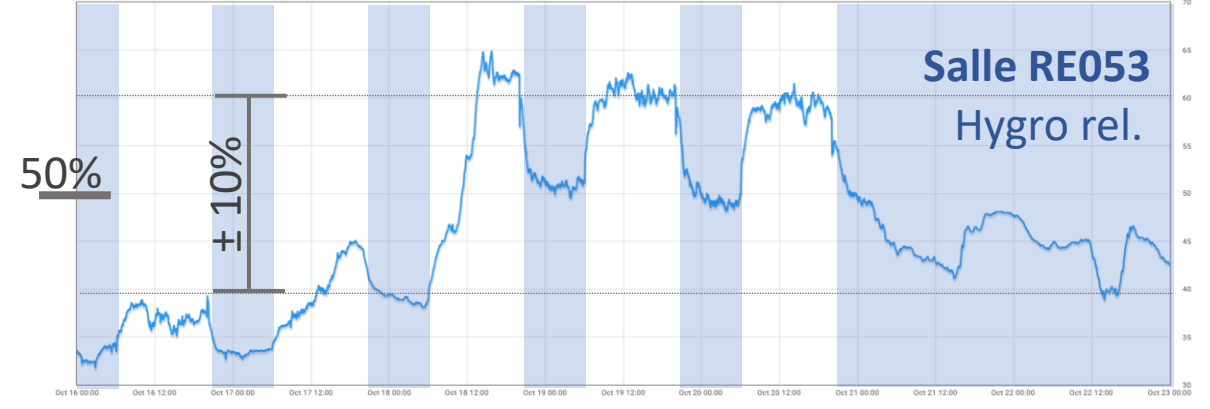
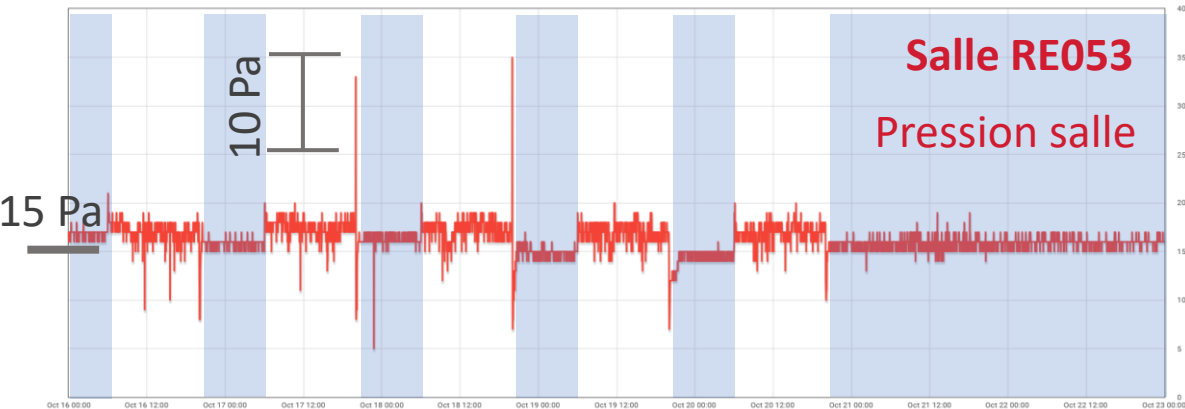
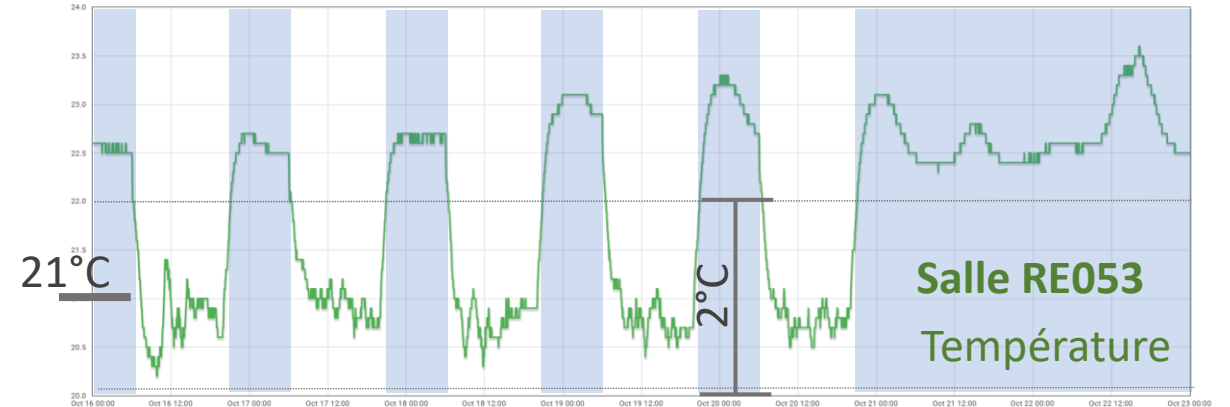
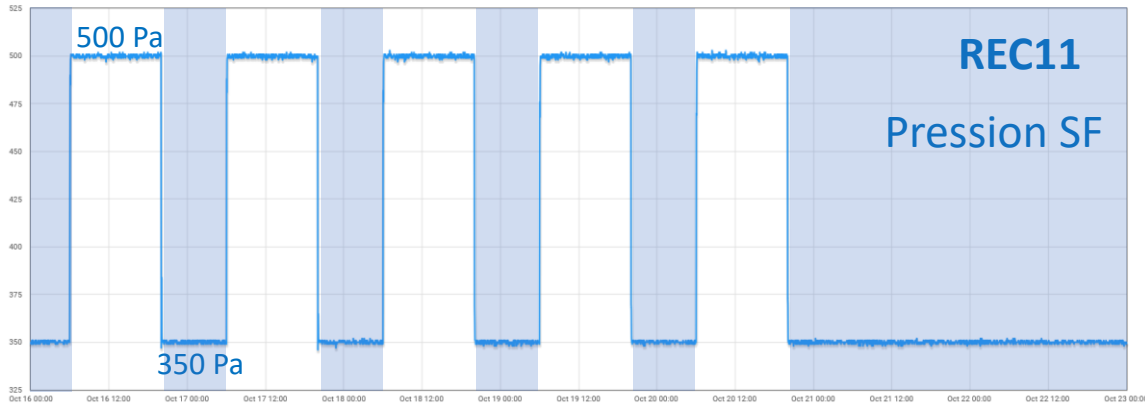
Période du 21/08 au 27/08/2023 (été)



Période plus longue => 2023-08-21 à 2023-10-18

# TRANSITOIRES – bascule NORMAL/ REDUIT

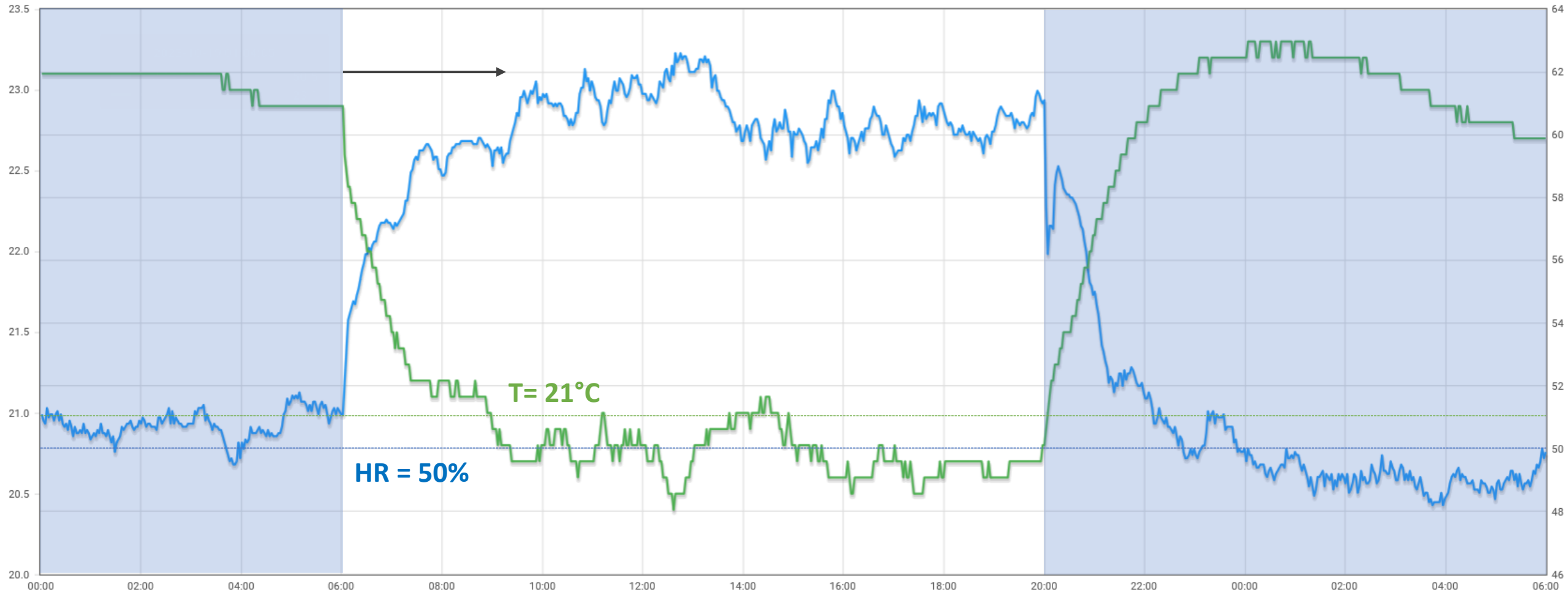
## REC11 – salle RE053



# TRANSITOIRES – bascule NORMAL/ REDUIT

REC11 – salle RE053

Durée transitoire ~1h 30



# TRANSITOIRES – bascule NORMAL/ REDUIT

