

# DIMENSIONNEMENT ET GESTION D'UN SYSTÈME DE STOCKAGE THERMIQUE PAR HYDRO- ACCUMULATION : APPLICATION À LA CHAUFFERIE MULTI-ÉNERGIE DE MAROMME

COFELY GDF-Suez / PROMES-CNRS  
/ Université de Perpignan Via Domitia

Mouchira LABIDI, Julien EYNARD, Olivier FAUGEROUX et Stéphane GRIEU

5èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS  
11-12 juillet 2013



UPVD

Université de Perpignan Via Domitia



# Sommaire

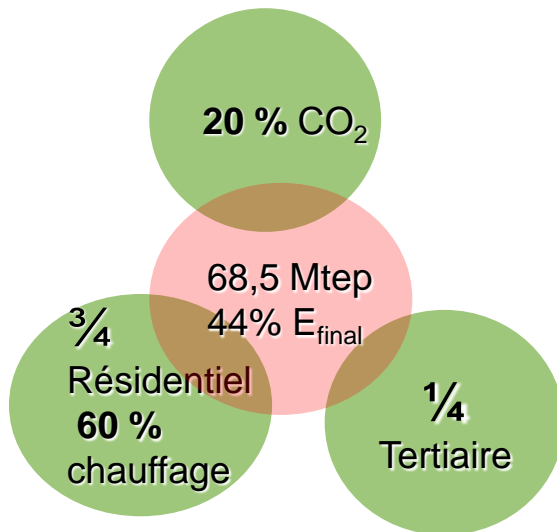
1. Contexte énergétique
2. Chaufferie collective mixte
3. Stratégie de dimensionnement du système d'hydro-accumulation
4. Approche de gestion
5. Approche de dimensionnement
6. Un cas d'étude : la chaufferie de Maromme
7. Conclusions et perspectives

# Contexte énergétique

## Enjeux majeurs :

- Maîtrise de la consommation d'énergie
- Lutte contre le changement climatique

## FRANCE



## Objectif :

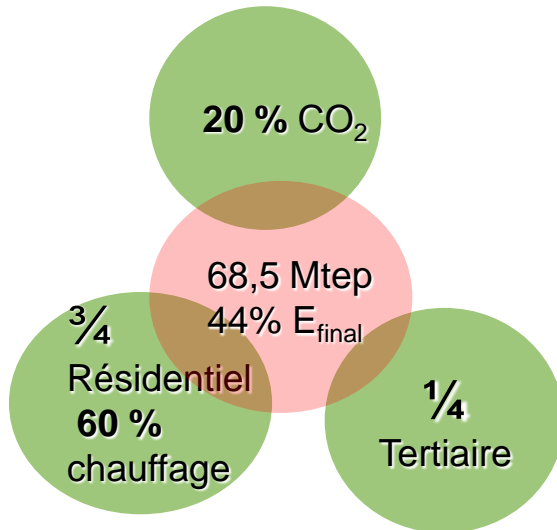
Diminuer de 38 % la consommation d'énergie entre 2006 et 2020

# Contexte énergétique

## Enjeux majeurs :

- Maîtrise de la consommation d'énergie
- Lutte contre le changement climatique

## FRANCE



## Objectif :

Diminuer de 38 % la consommation d'énergie entre 2006 et 2020

## Agir sur :

- Les qualités intrinsèques des bâtiments
- Le comportement des occupants
- Le fonctionnement des moyens de production de chaleur

# Contexte énergétique

Chauffage individuel

- Chaudière gaz
- Ballon d'eau chaude électrique
- Convection électrique



Chauffage collectif

Chaufferie collective mixte  
desservant un ou plusieurs  
quartiers

# Contexte énergétique

Chauffage individuel

- Chaudière gaz
- Ballon d'eau chaude électrique
- Convection électrique



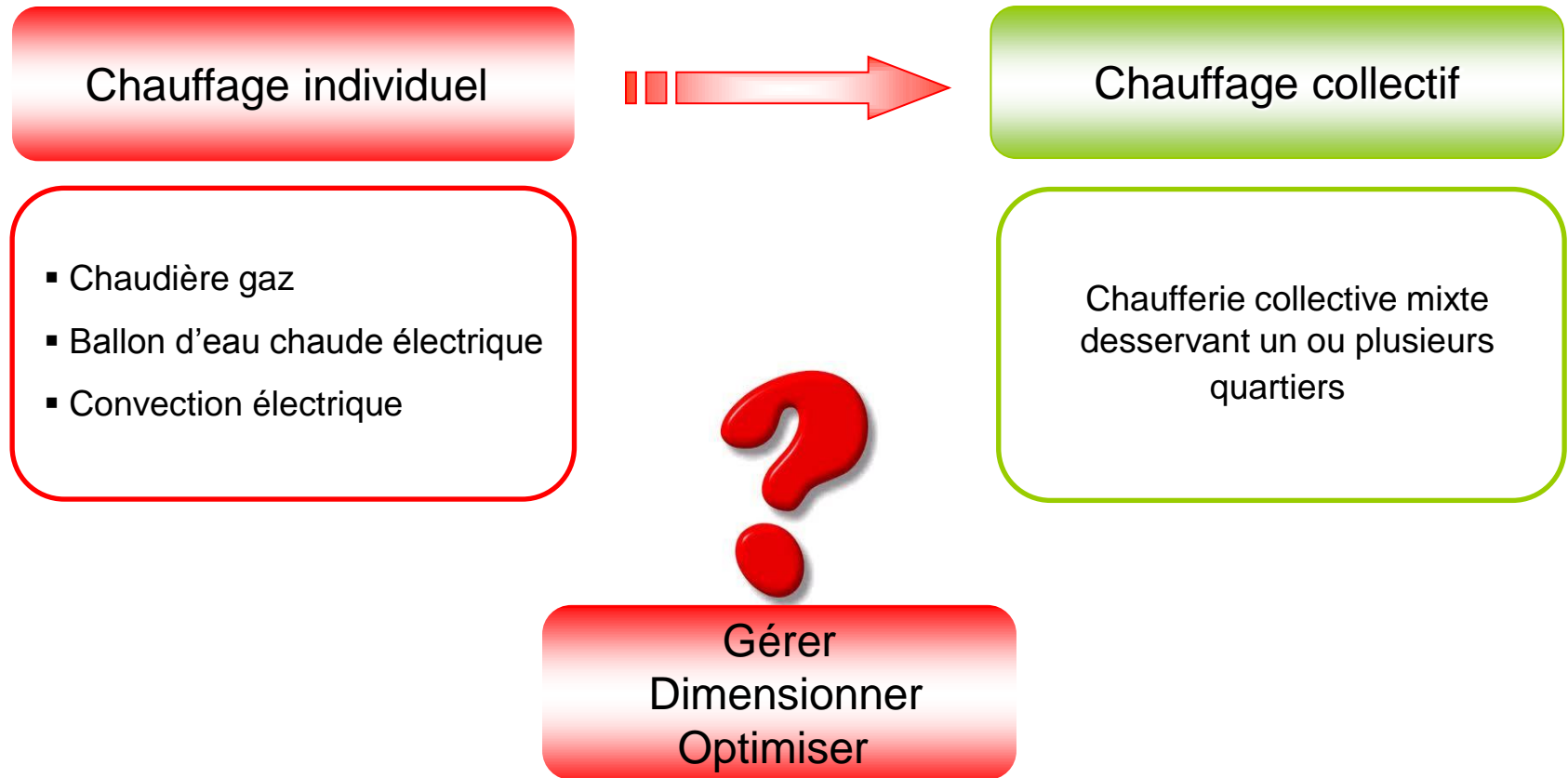
Chauffage collectif

Chaufferie collective mixte  
desservant un ou plusieurs  
quartiers



Gérer  
Dimensionner  
Optimiser

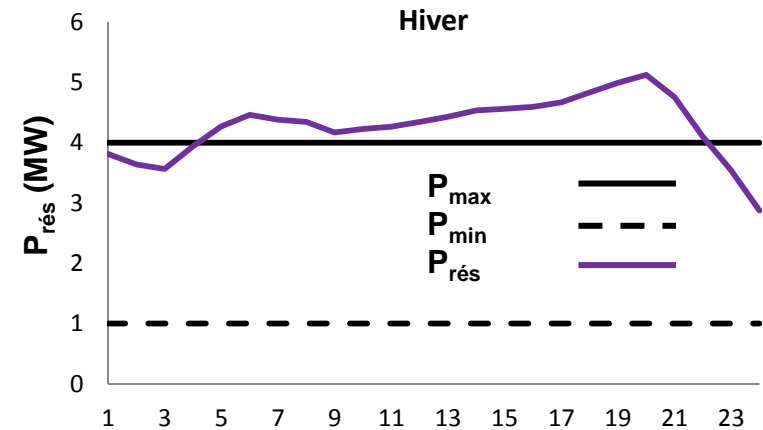
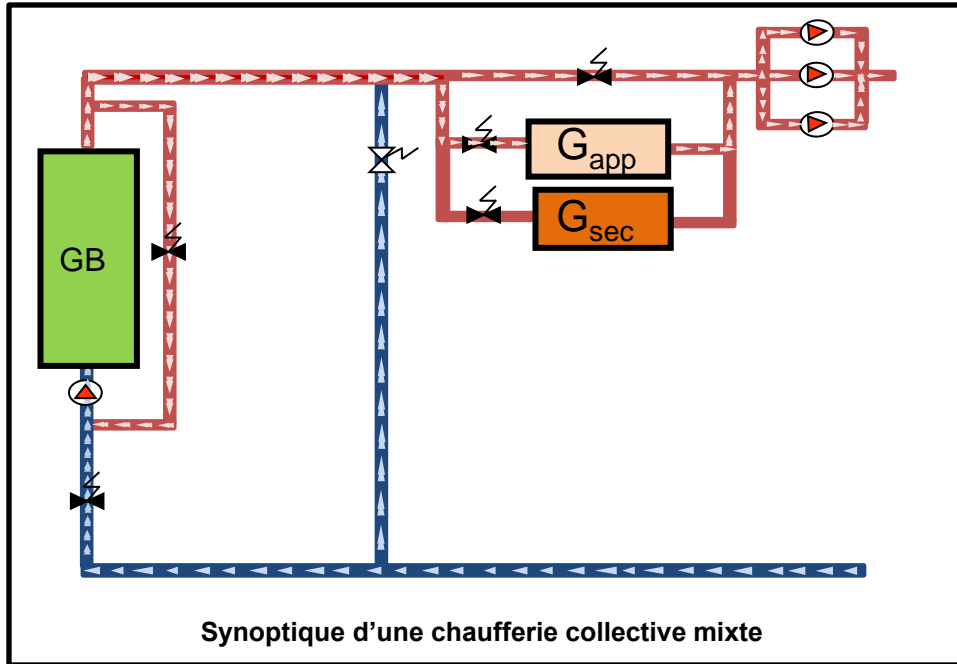
# Contexte énergétique



## Opti'EnR : Optimisation des chaufferies collectives mixtes

- Étude de la pertinence de l'implantation de systèmes de stockage thermique
- Développement d'approches avancées et performantes de gestion / régulation

# Chaufferie collective mixte



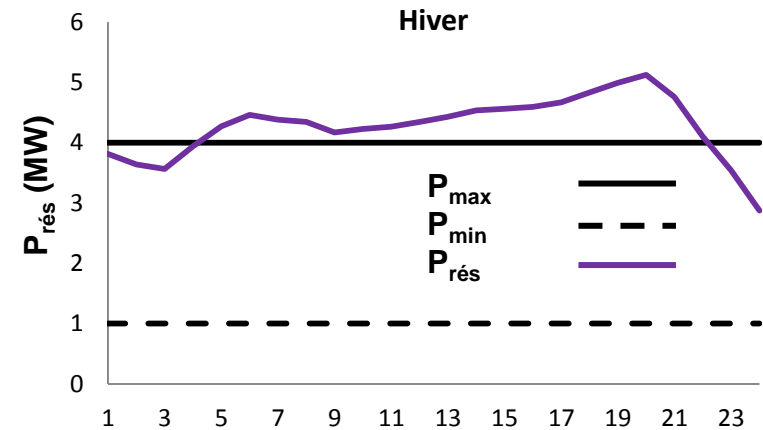
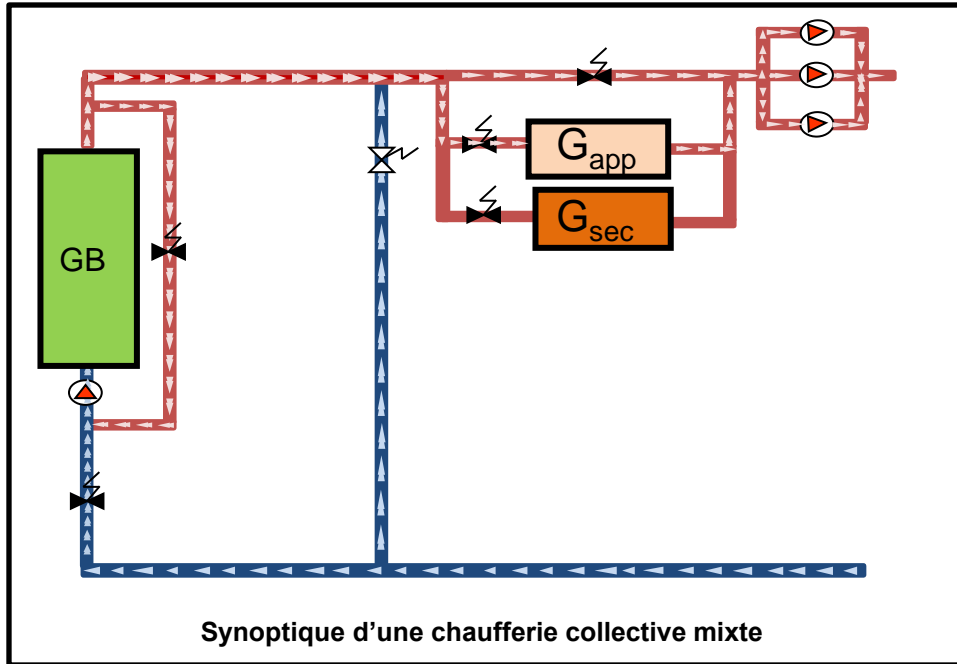
- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{min} ; P_{max}]$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{app}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{sec}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble

5/18 → Demande réseau variable



# Chaudière collective mixte

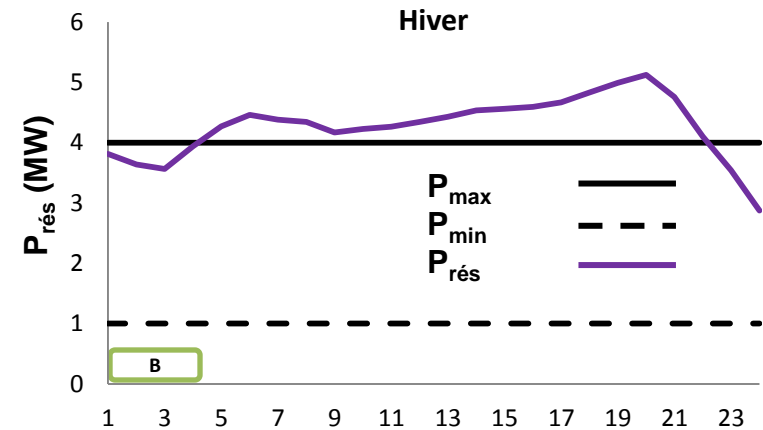
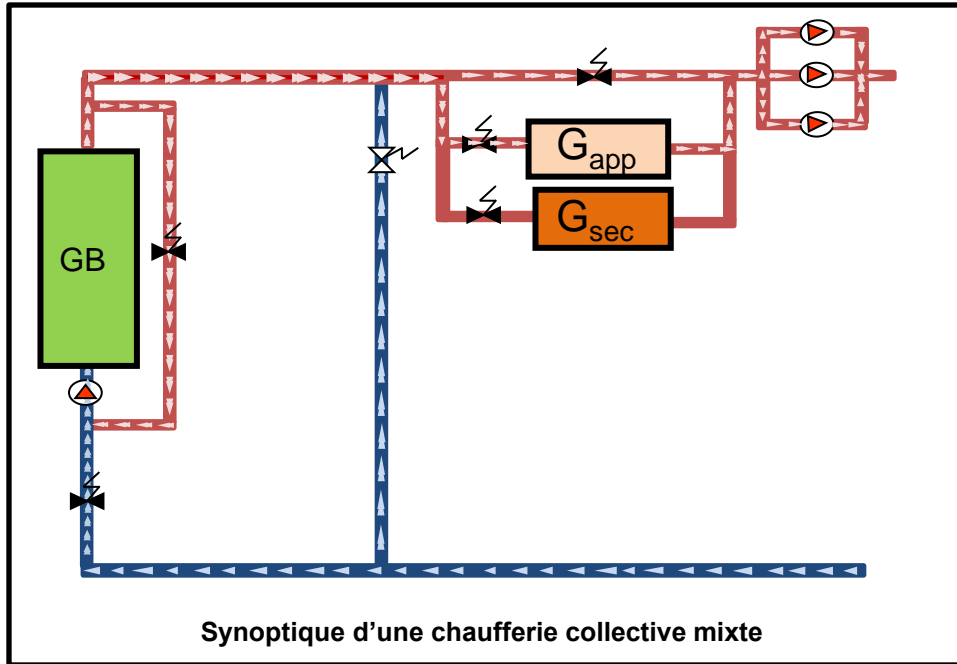


- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{min} ; P_{max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{app}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{sec}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble

5/18 → Demande réseau variable

# Chaudière collective mixte

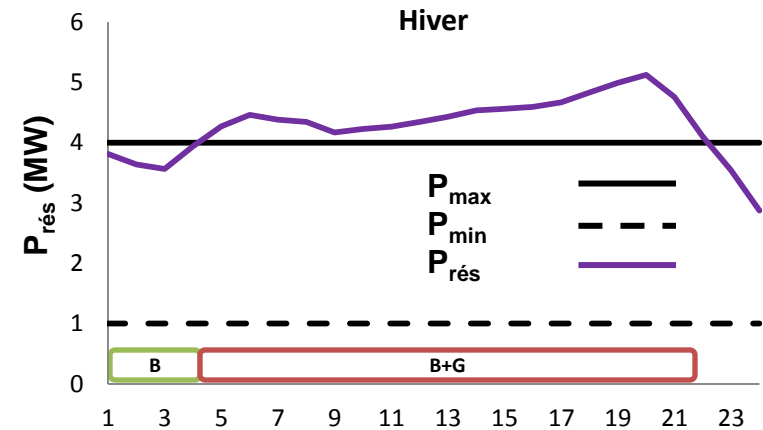
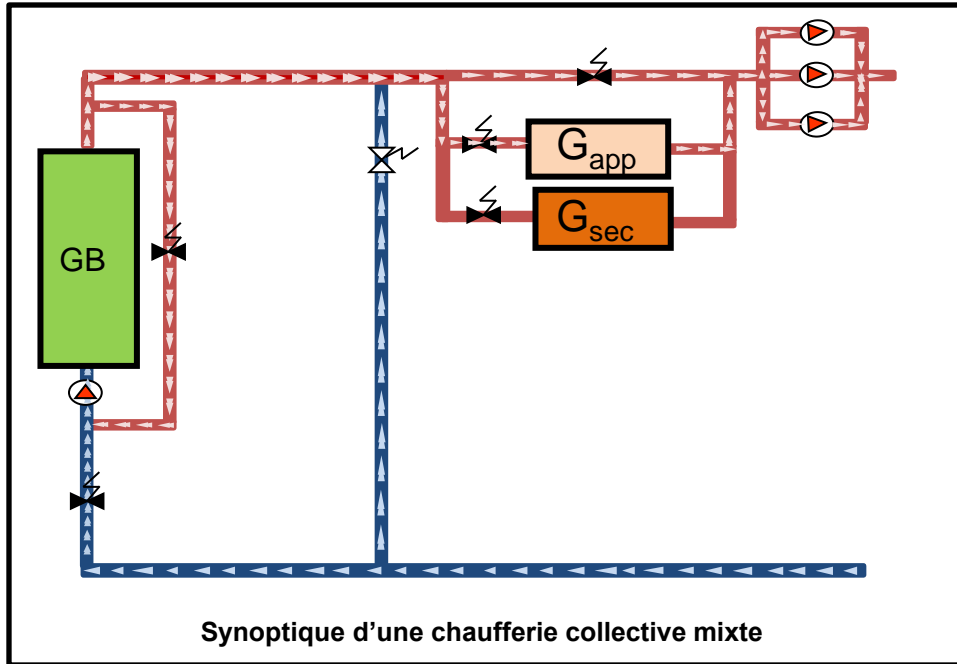


- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{min} ; P_{max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{app}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{sec}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble

→ Demande réseau variable

# Chaudière collective mixte

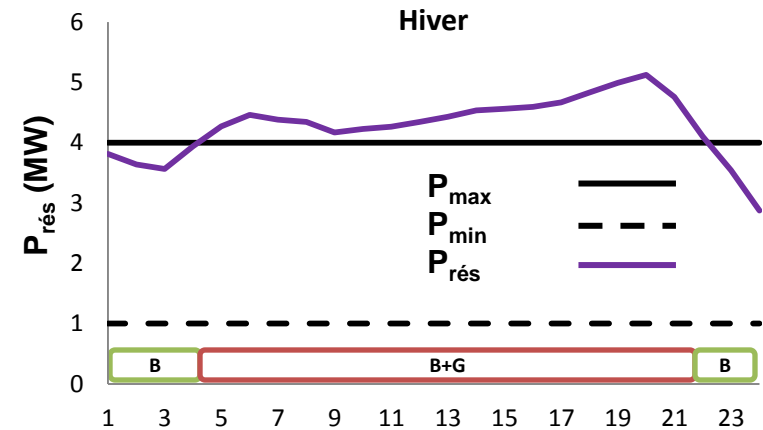
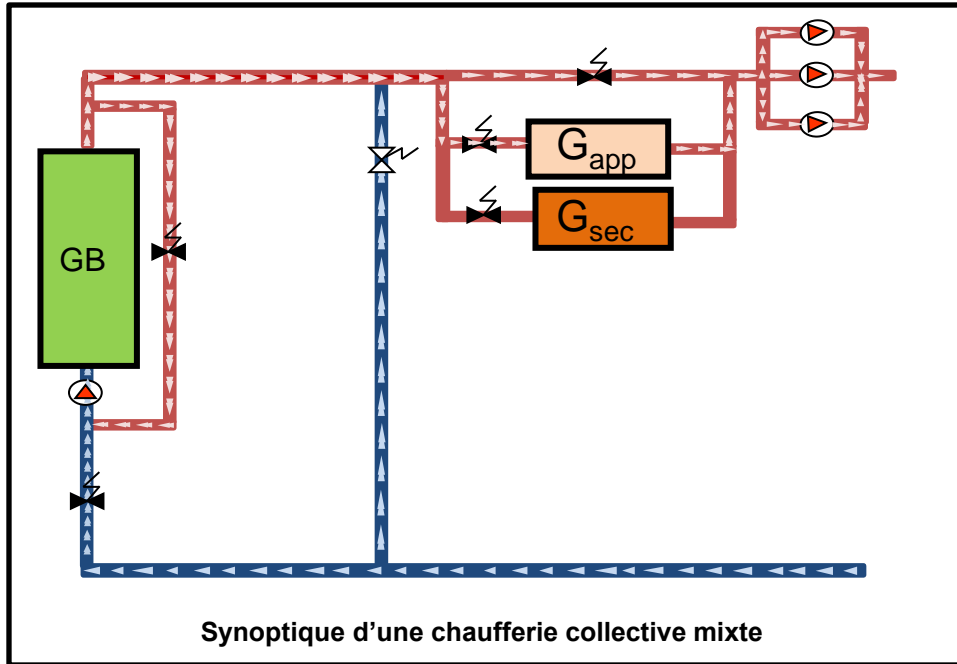


- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{min} ; P_{max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{app}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{sec}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble

5/18 → Demande réseau variable

# Chaudière collective mixte

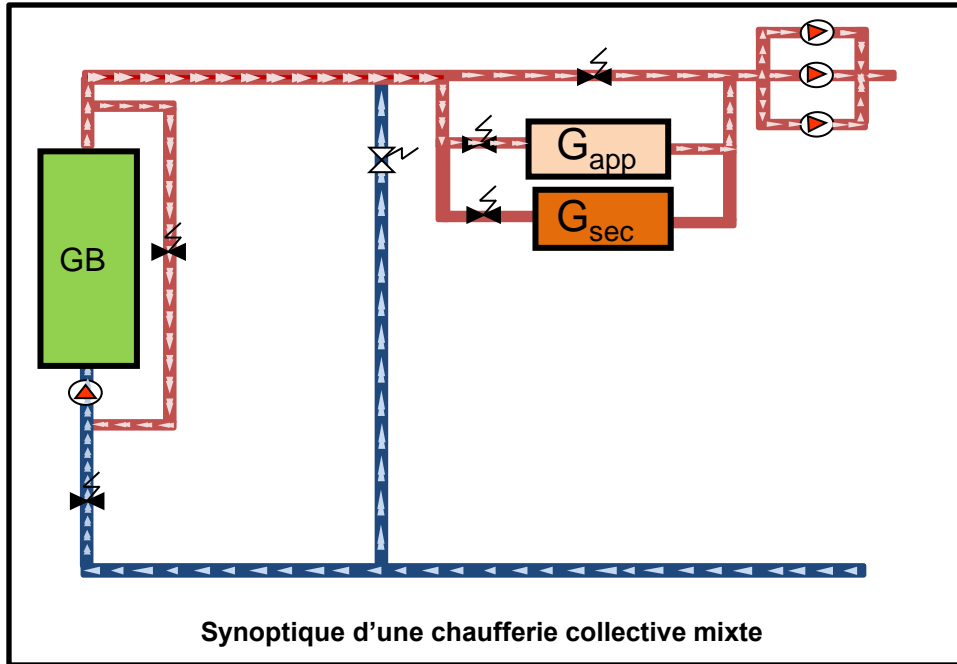


- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{min} ; P_{max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{app}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{sec}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble

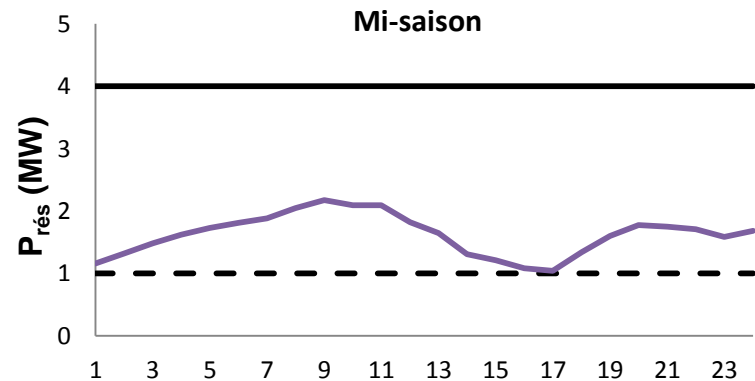
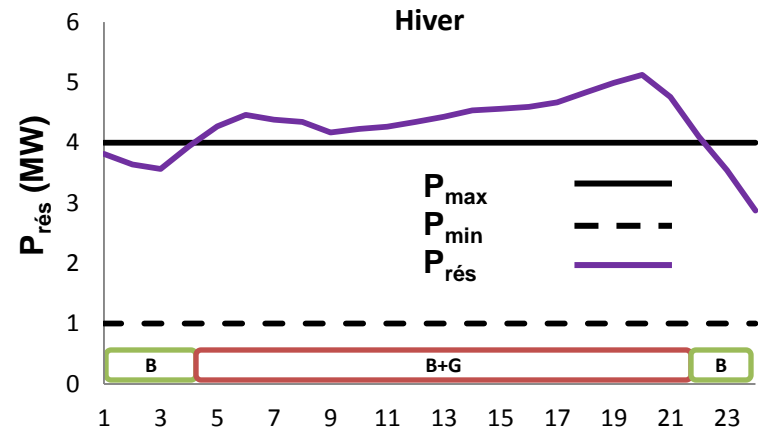
5/18 → Demande réseau variable

# Chaufferie collective mixte

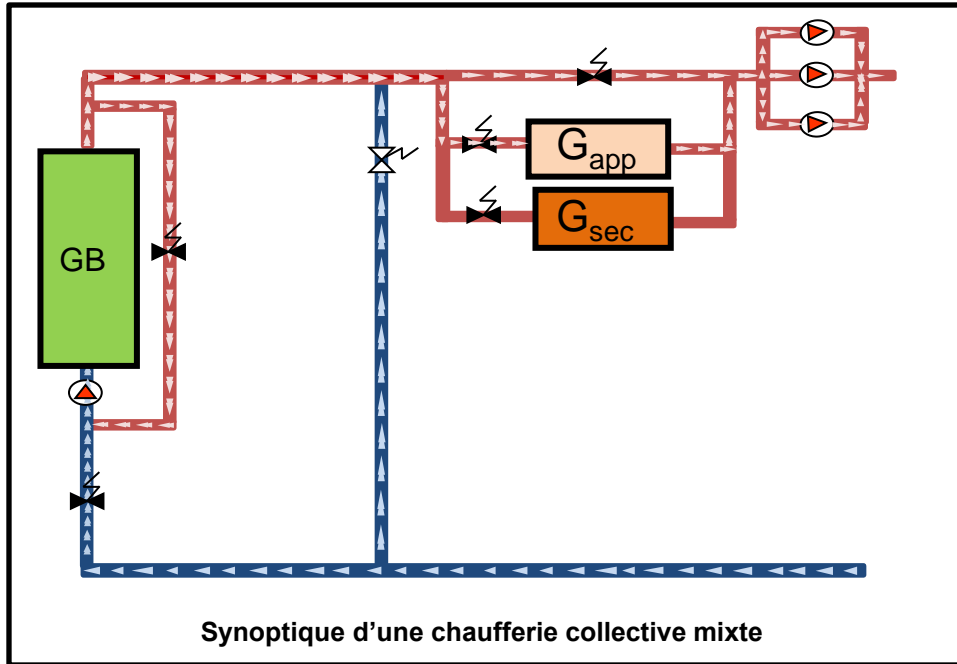


- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{min} ; P_{max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{app}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{sec}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble  
→ Demande réseau variable



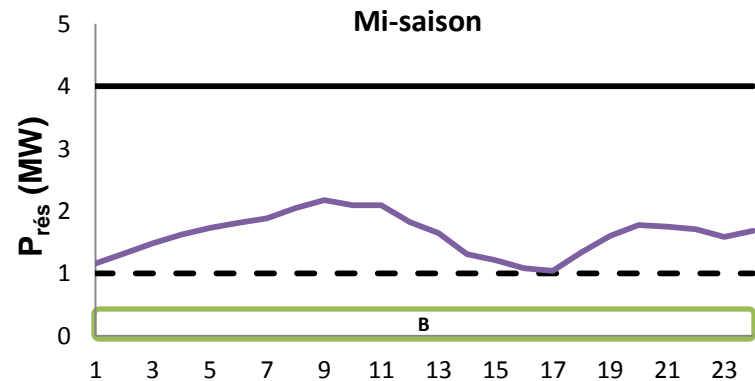
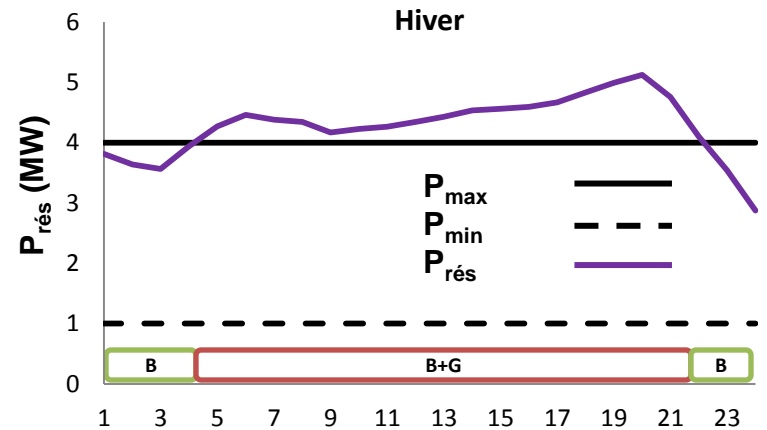
# Chaufferie collective mixte



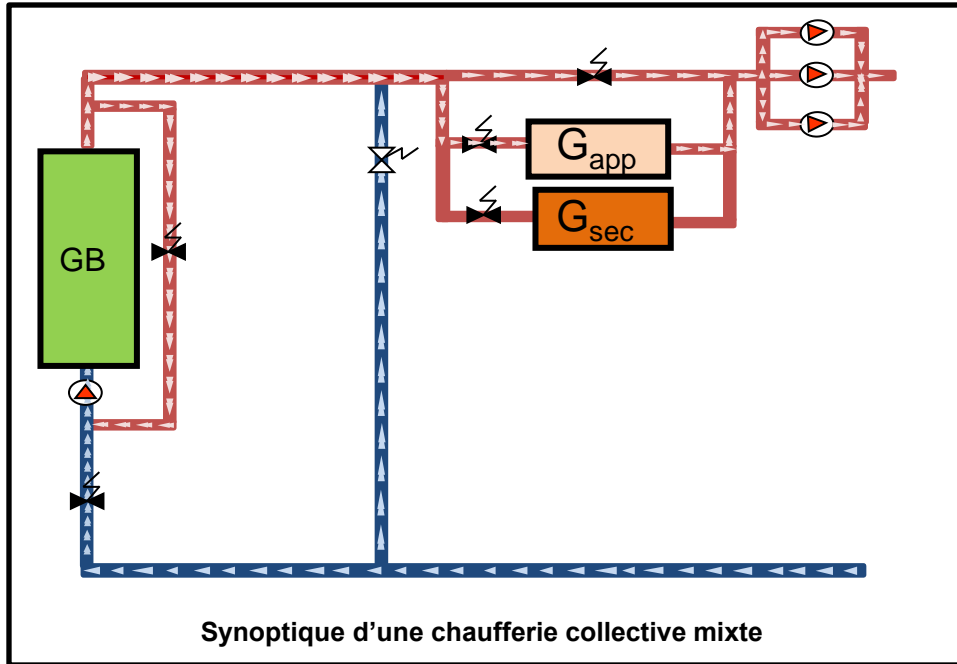
- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{\min} ; P_{\max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{\text{app}}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{\text{sec}}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble

→ Demande réseau variable

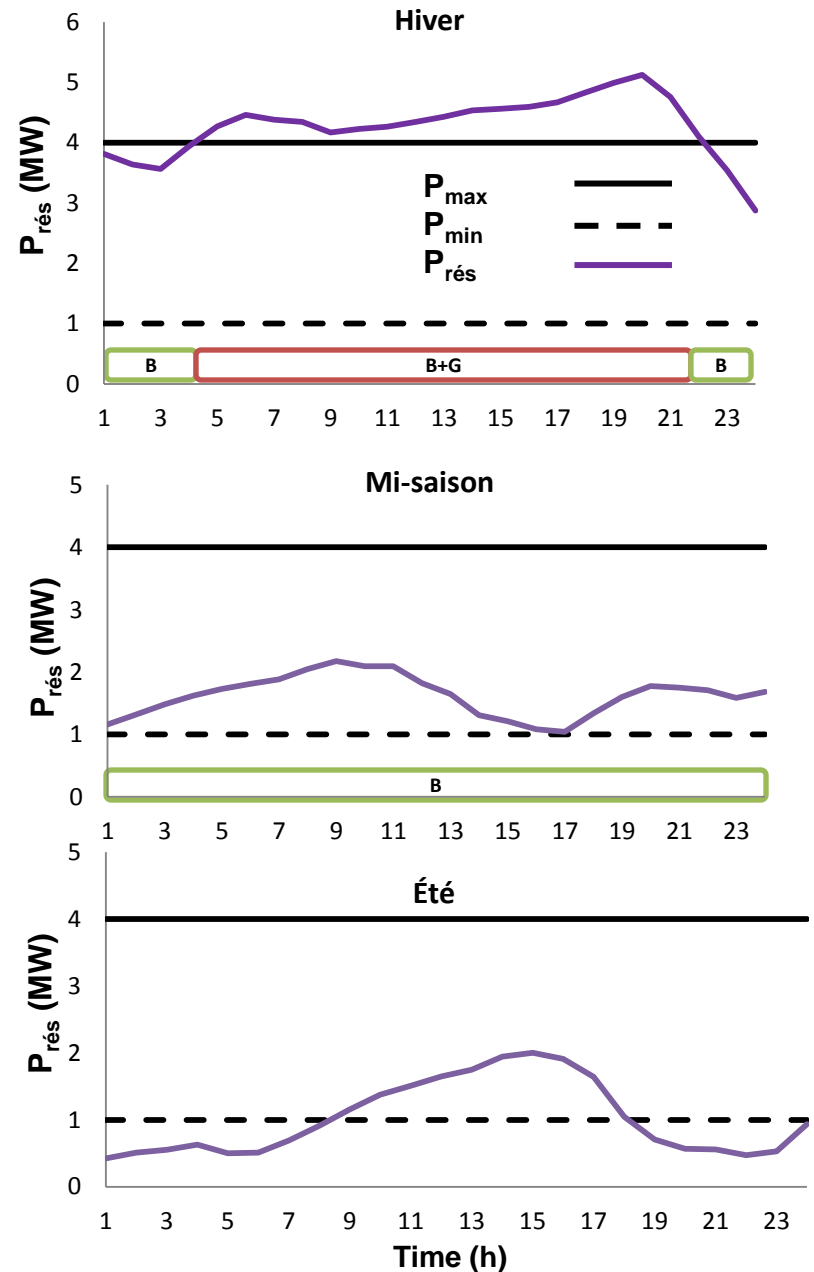


# Chaufferie collective mixte

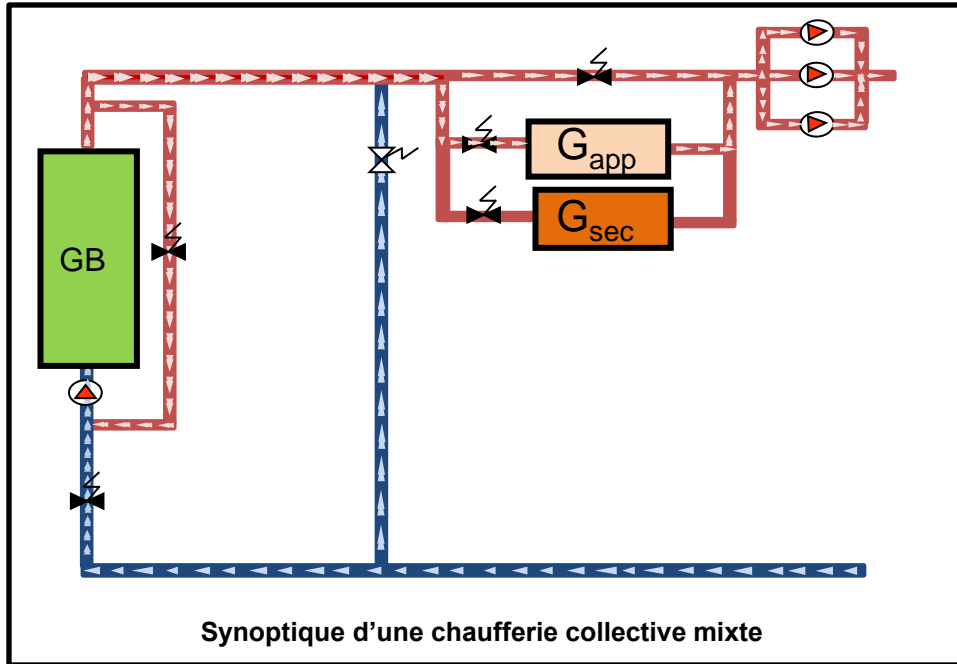


- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{\min} ; P_{\max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{\text{app}}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{\text{sec}}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble  
→ Demande réseau variable

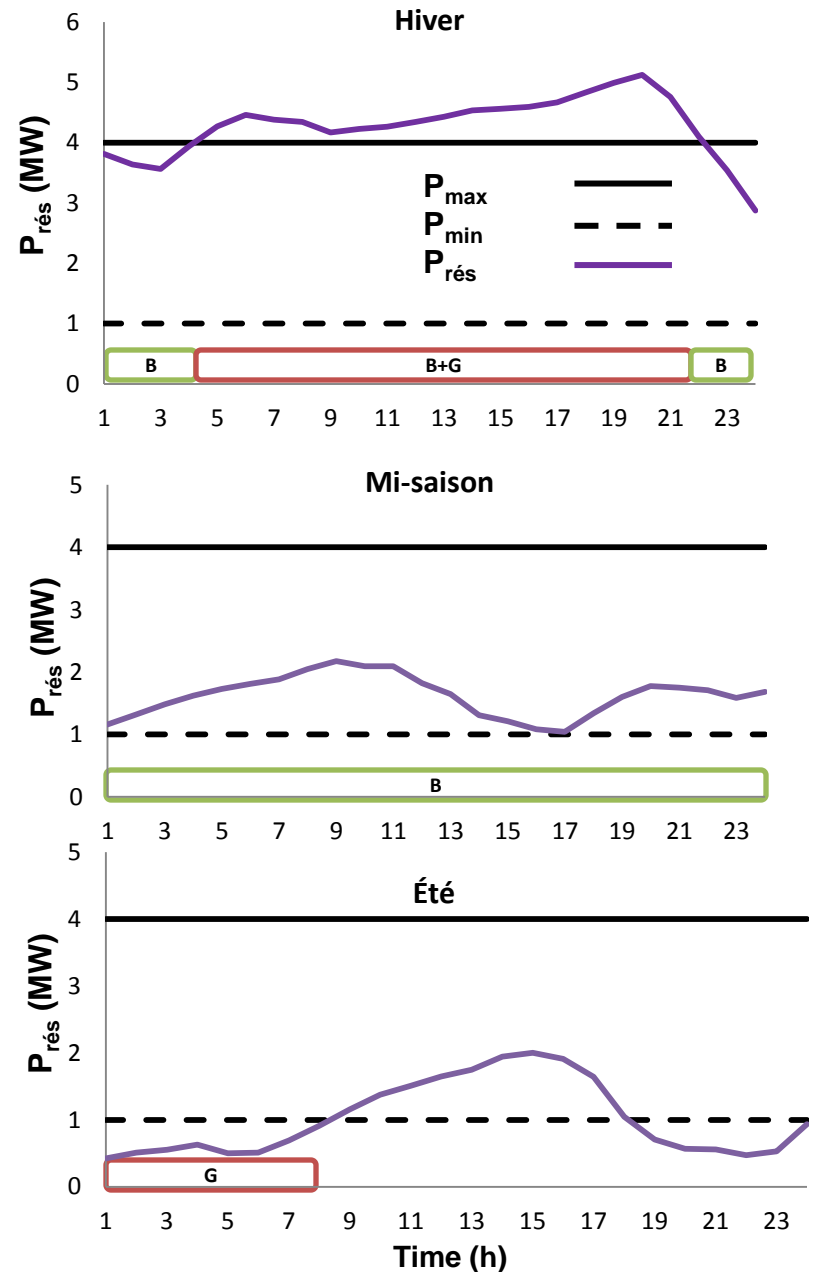


# Chaufferie collective mixte



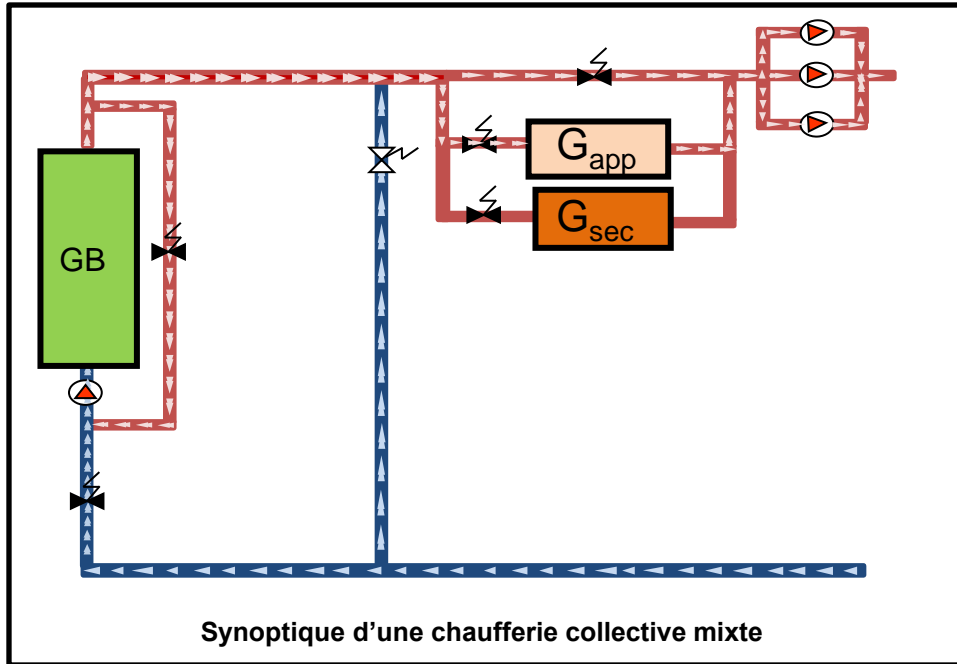
- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{min} ; P_{max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{app}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{sec}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

- Ensemble  
→ Demande réseau variable





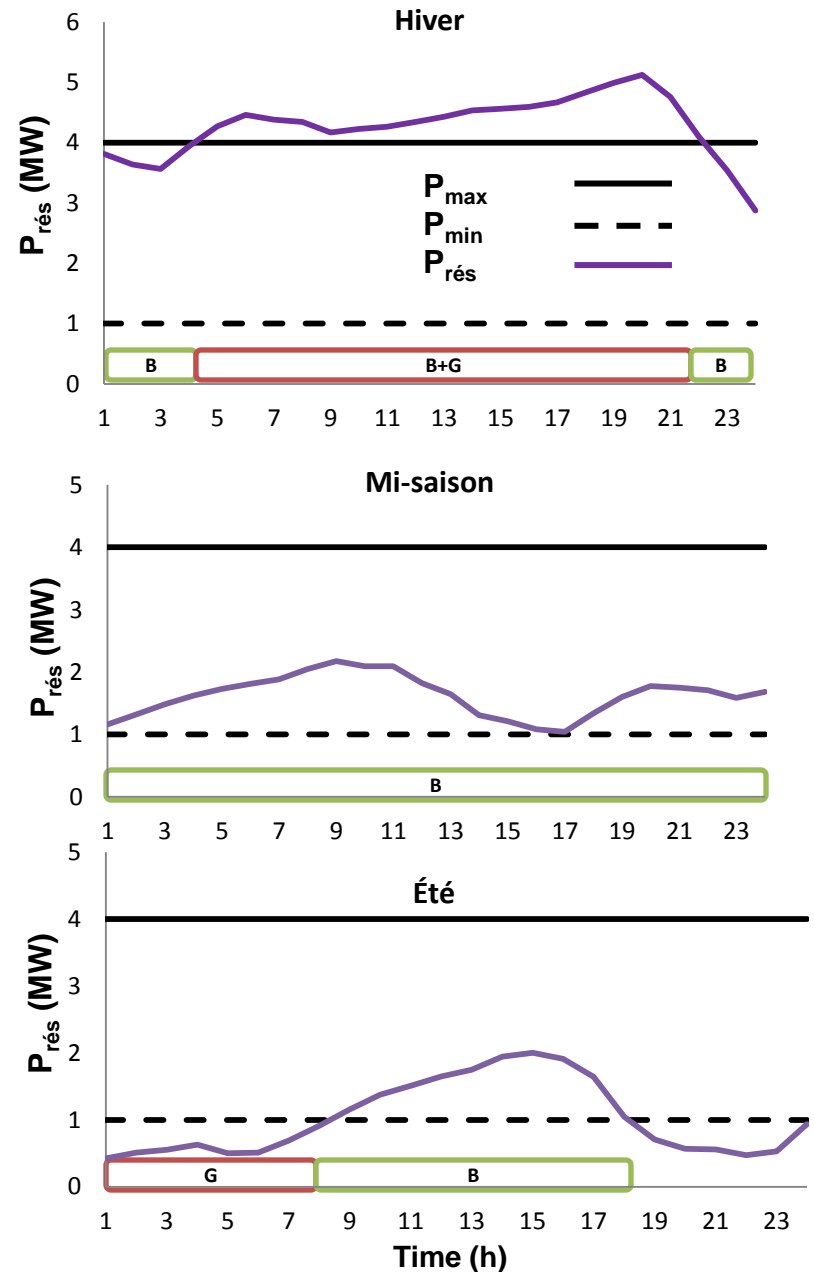
# Chaufferie collective mixte



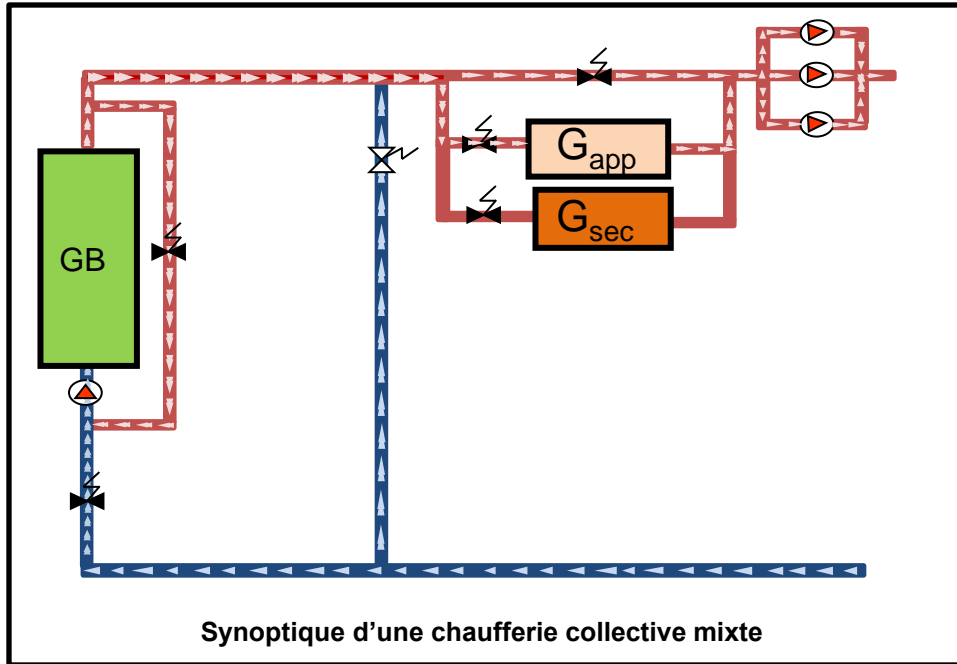
- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{\min} ; P_{\max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{\text{app}}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{\text{sec}}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

## Ensemble

→ Demande réseau variable



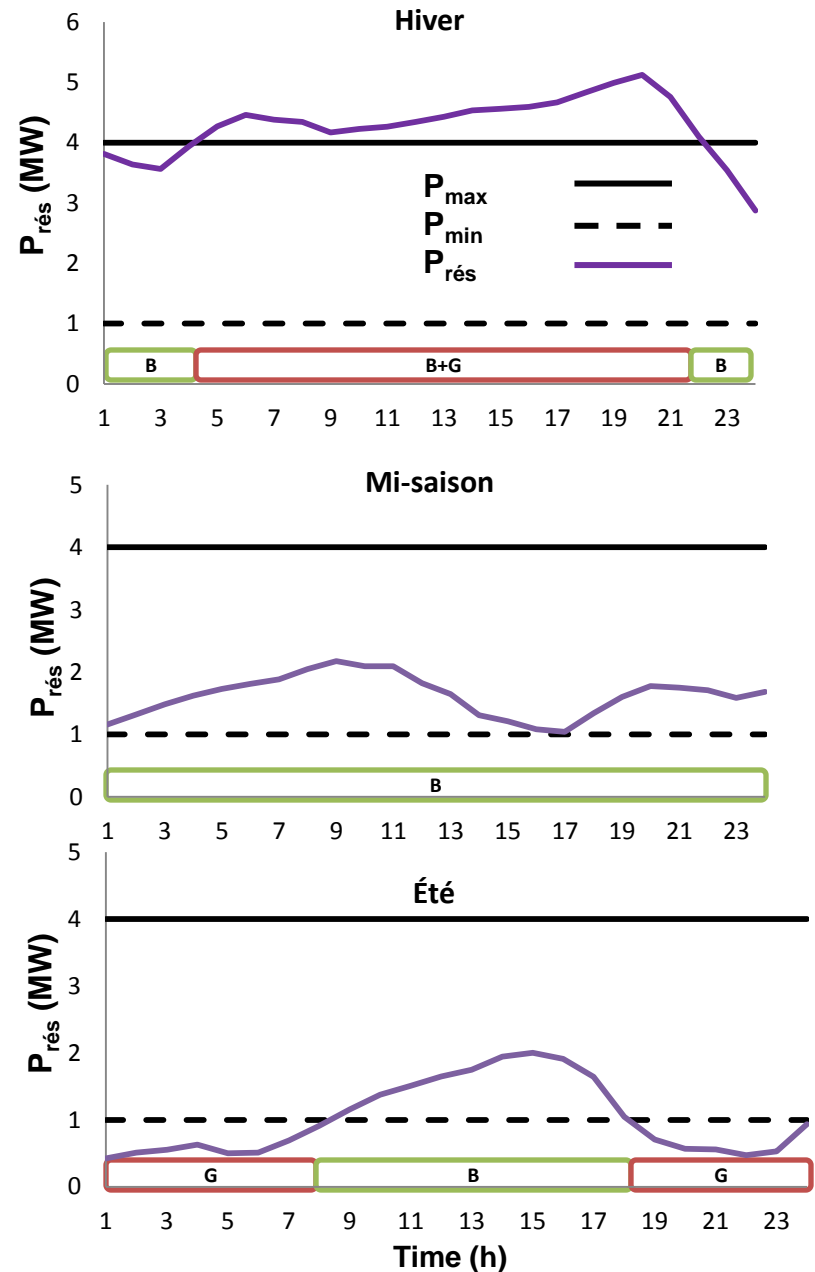
# Chaufferie collective mixte



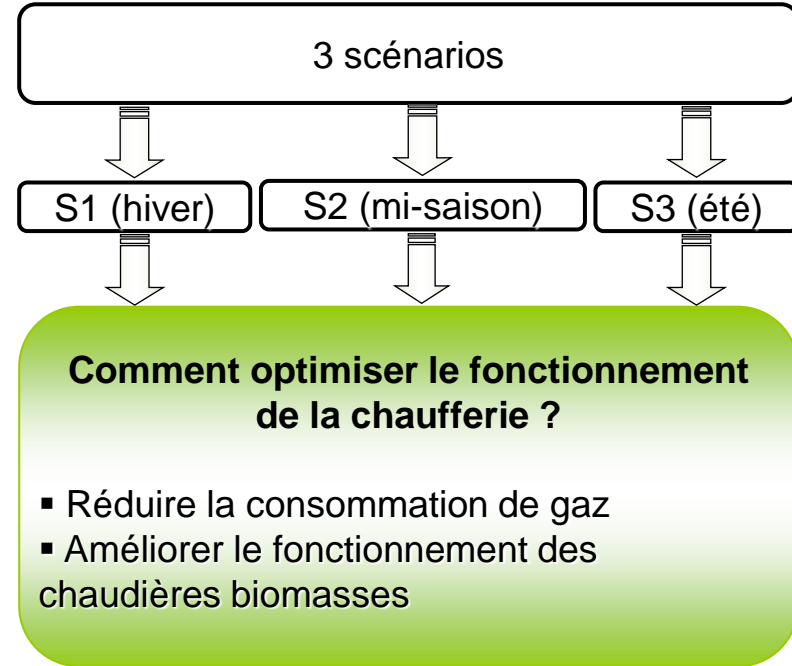
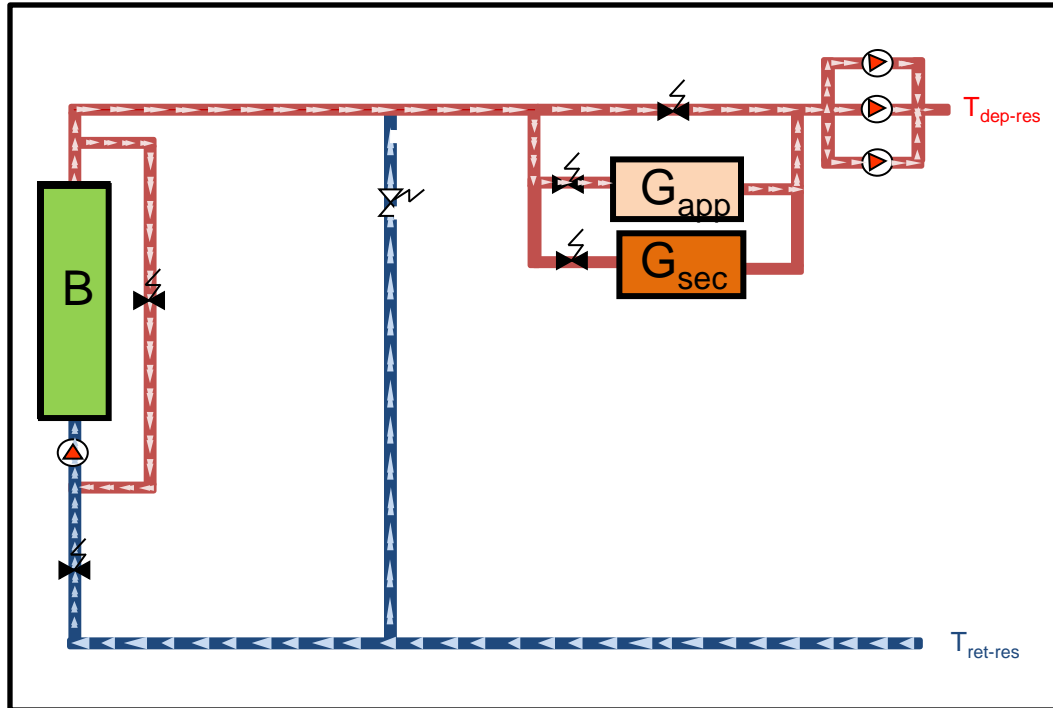
- Chaudière biomasse (B)  
→  $[P_{\min} ; P_{\max}] = [1 ; 4] \text{ MW}$
- Chaudière gaz d'appoint ( $G_{\text{app}}$ )  
→ Pics / creux de consommation
- Chaudière gaz de sécurité ( $G_{\text{sec}}$ )  
→ Maintenance / dysfonctionnement

## ▪ Ensemble

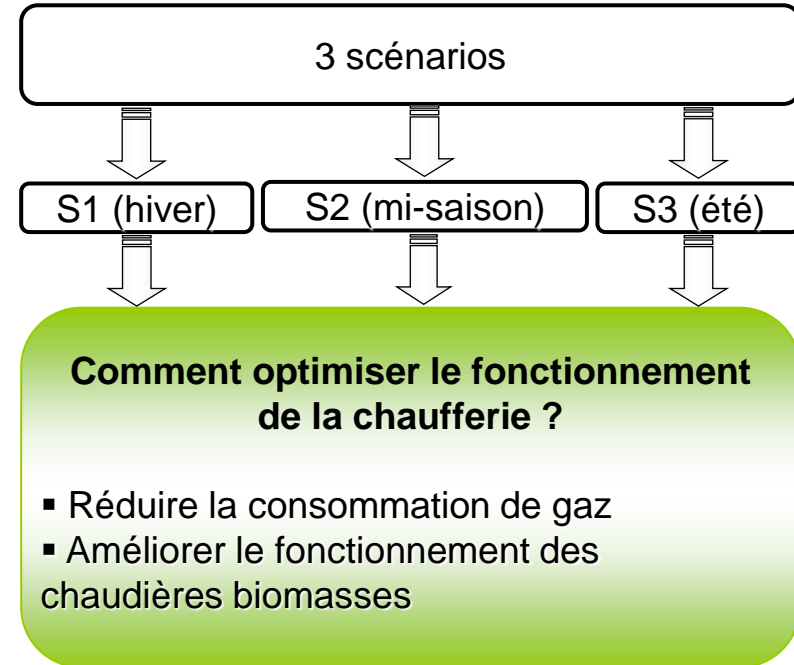
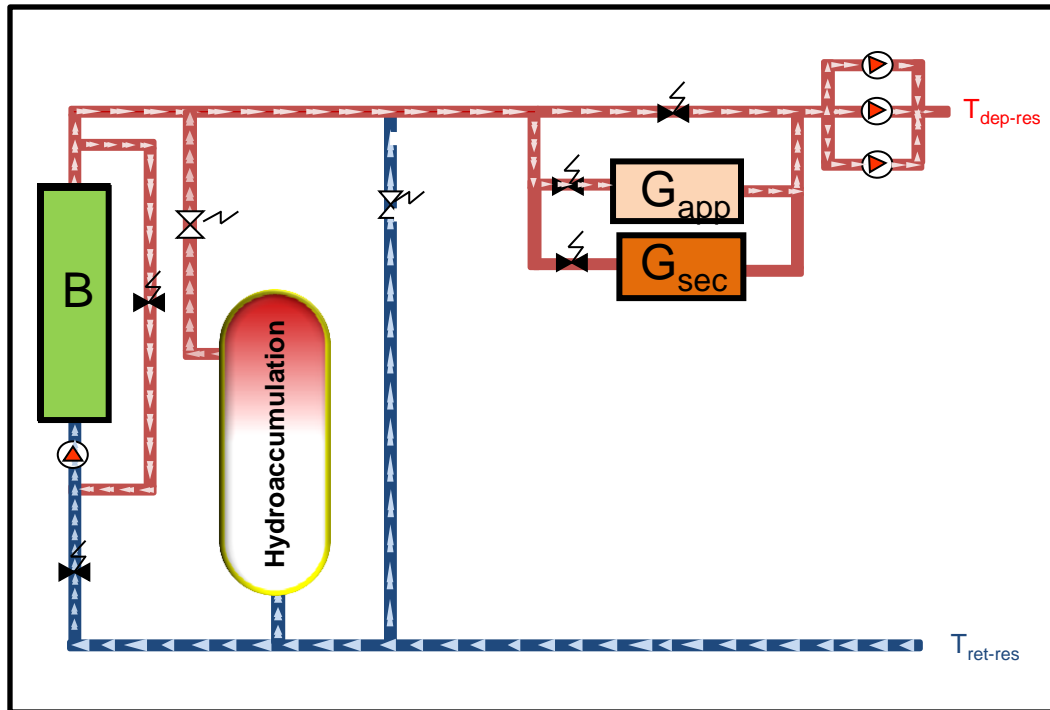
→ Demande réseau variable



# Chaufferie collective mixte

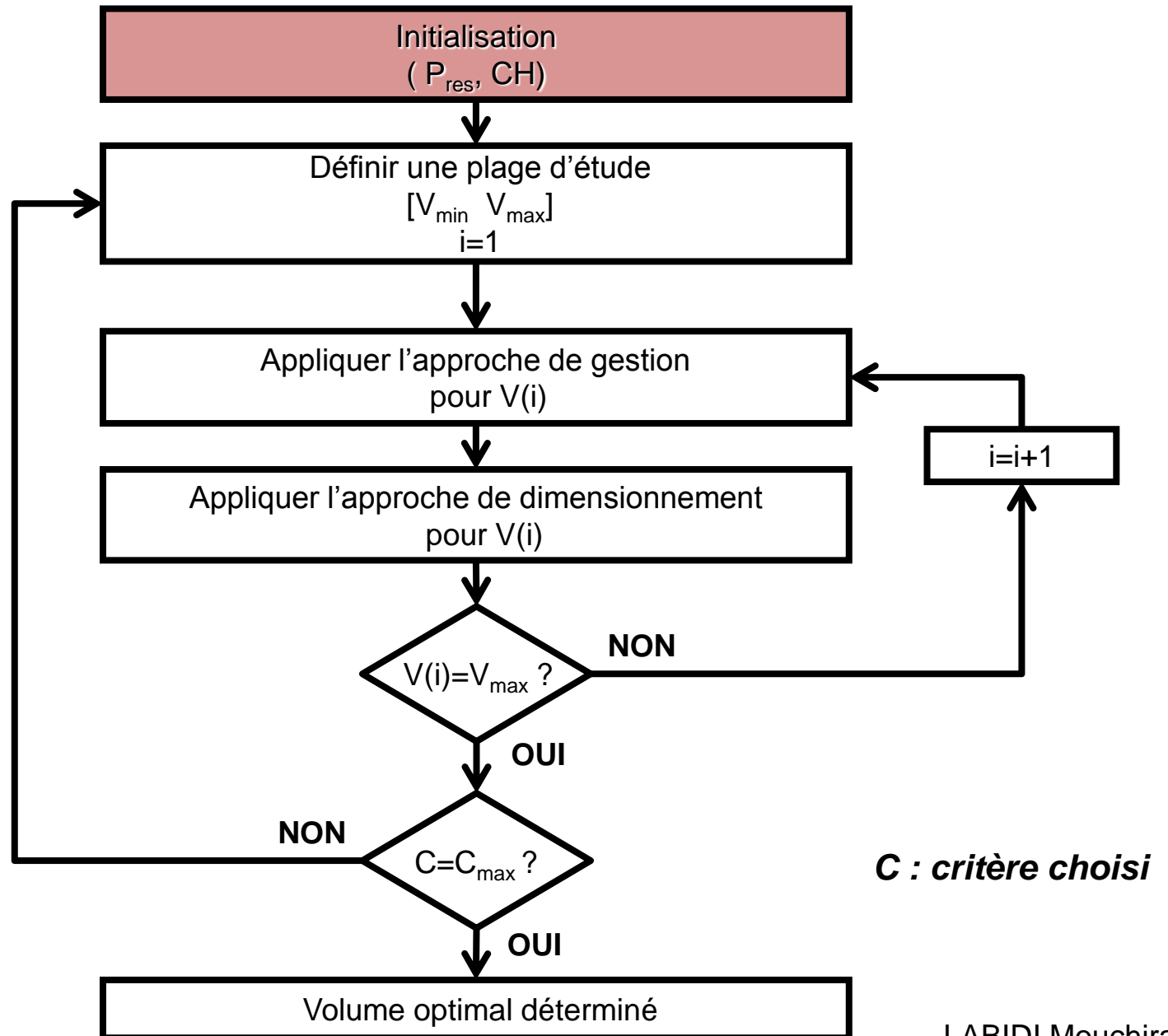


# Chaufferie collective mixte

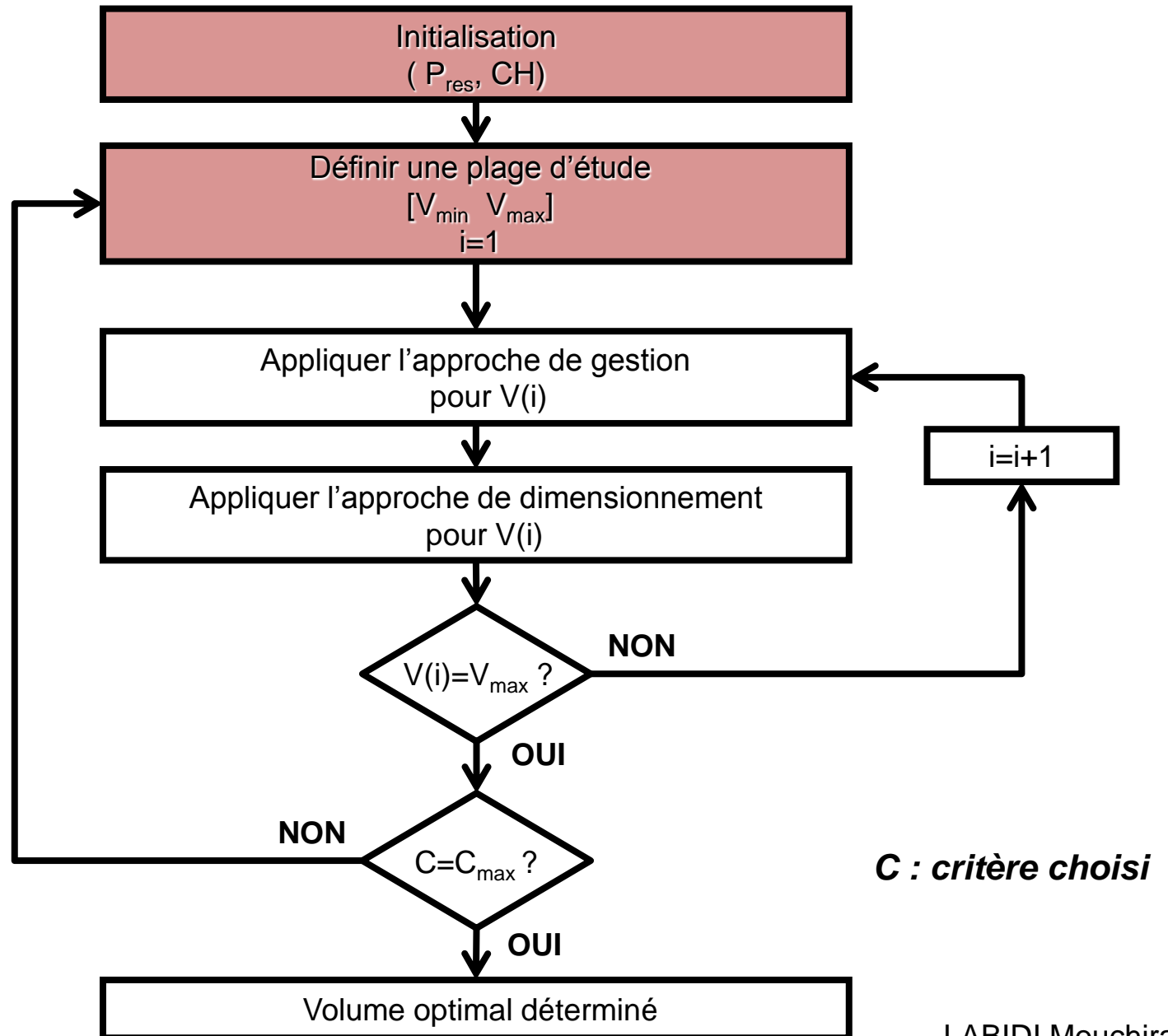


Comment gérer le système de stockage ?  
Comment dimensionner le système de stockage ?

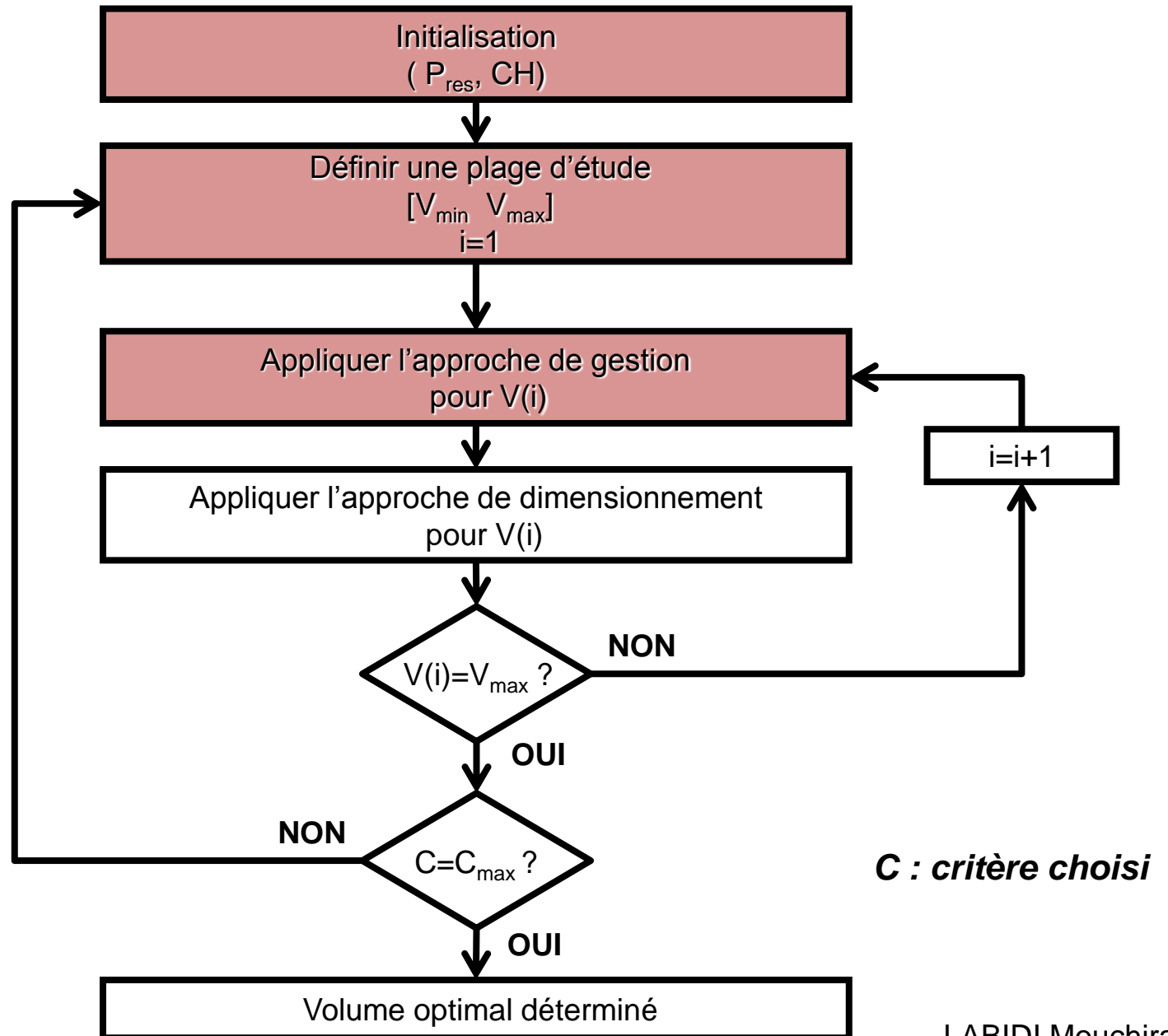
# Stratégie de dimensionnement



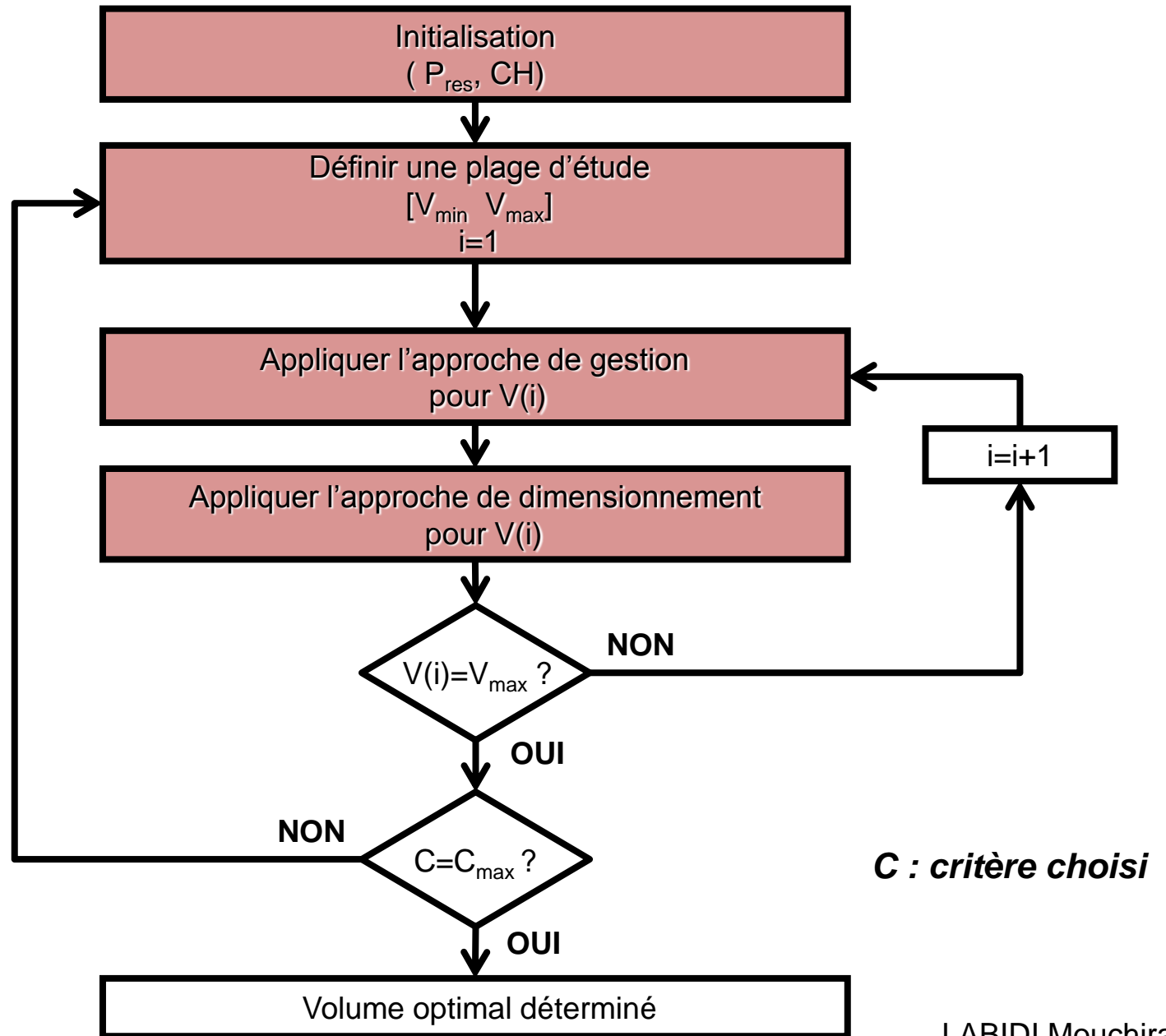
# Stratégie de dimensionnement



# Stratégie de dimensionnement

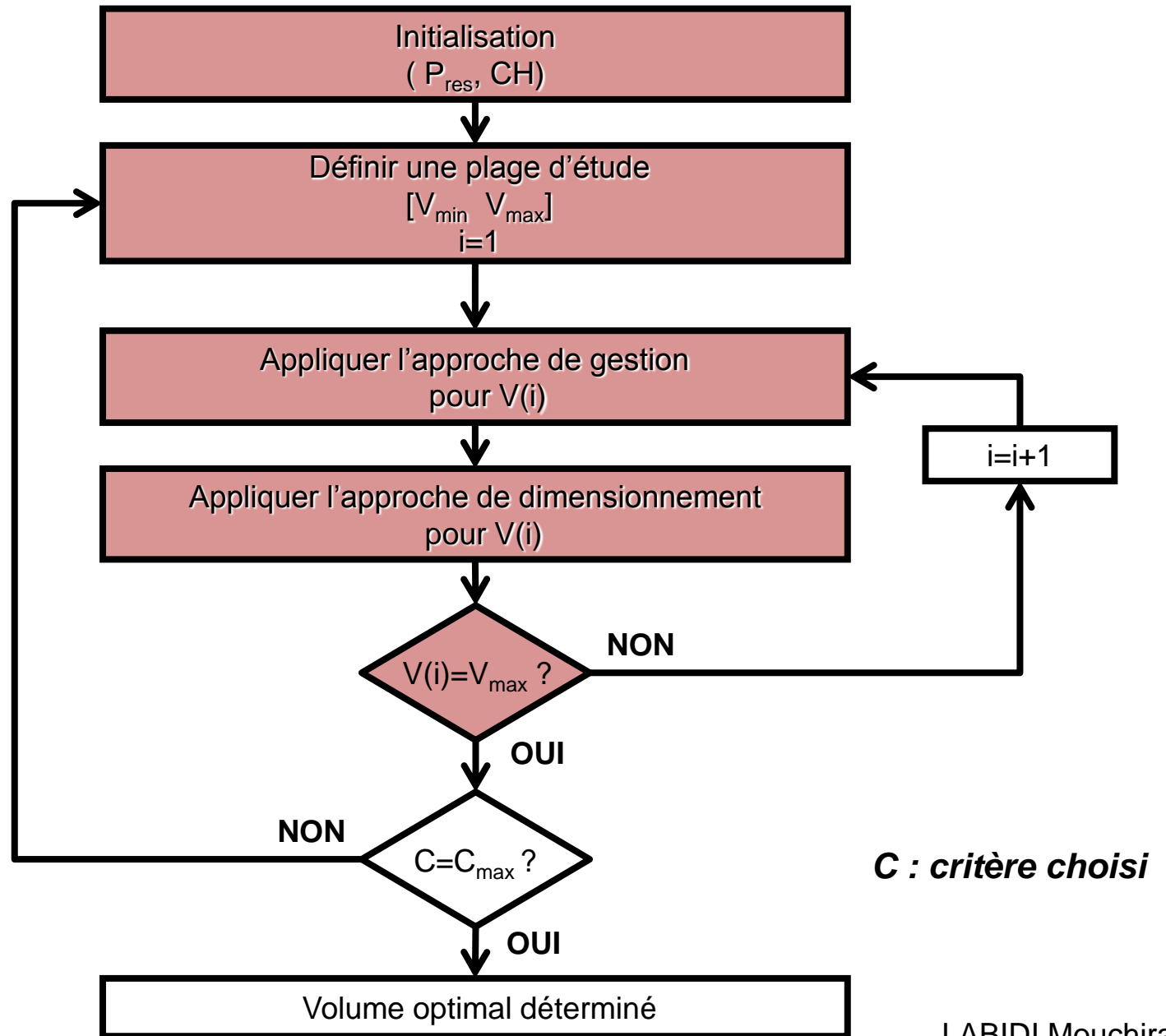


# Stratégie de dimensionnement

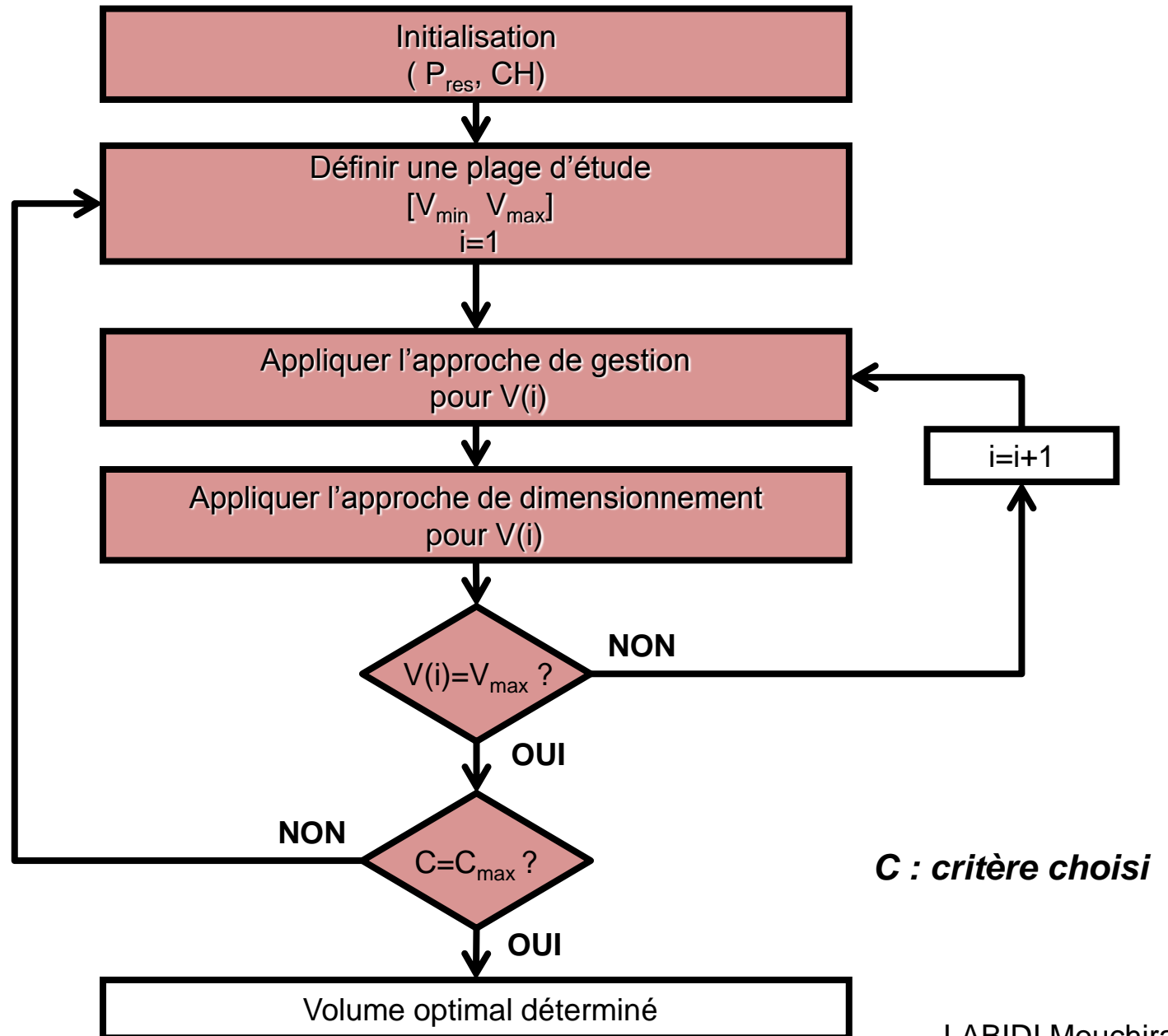




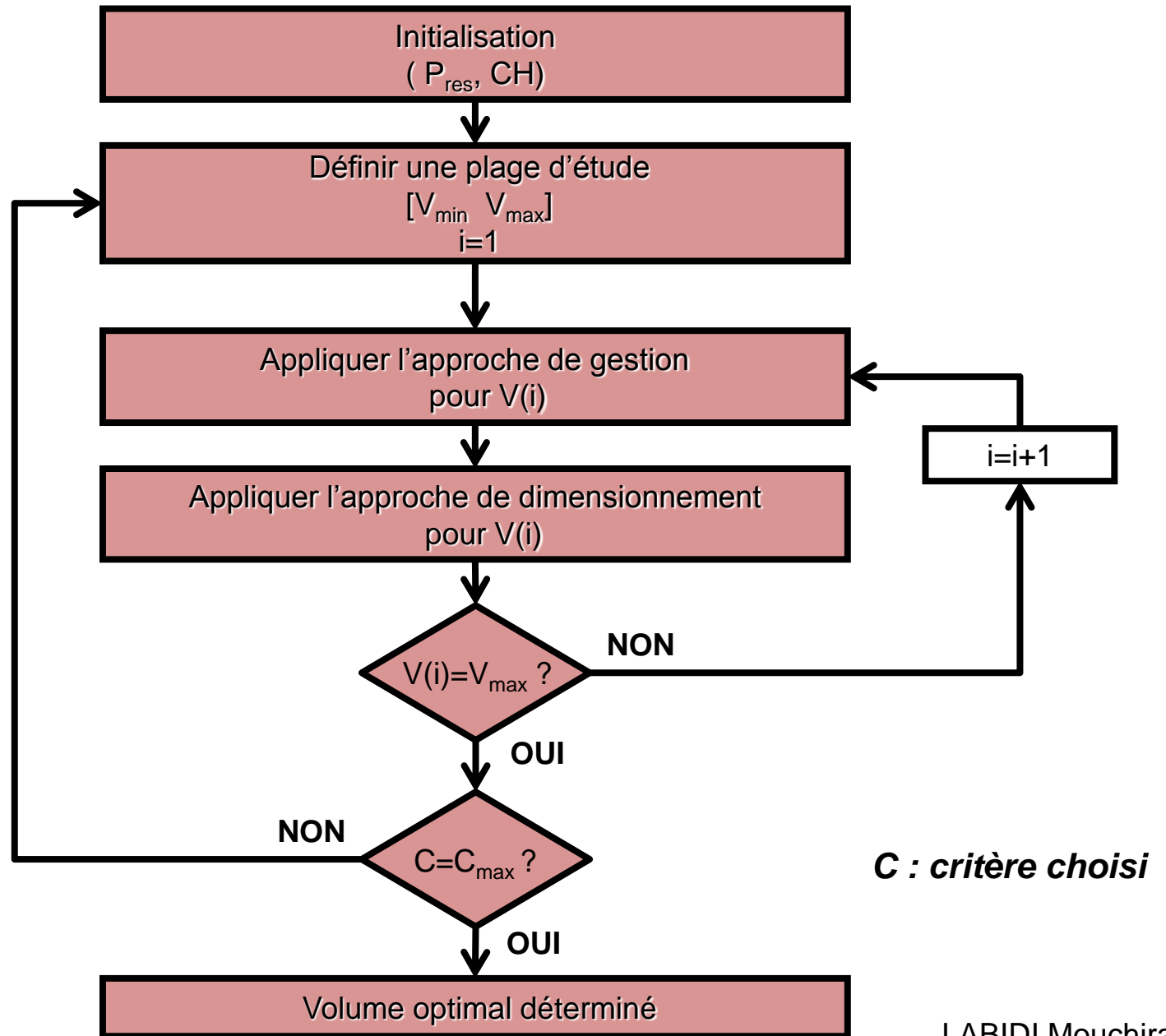
# Stratégie de dimensionnement



# Stratégie de dimensionnement

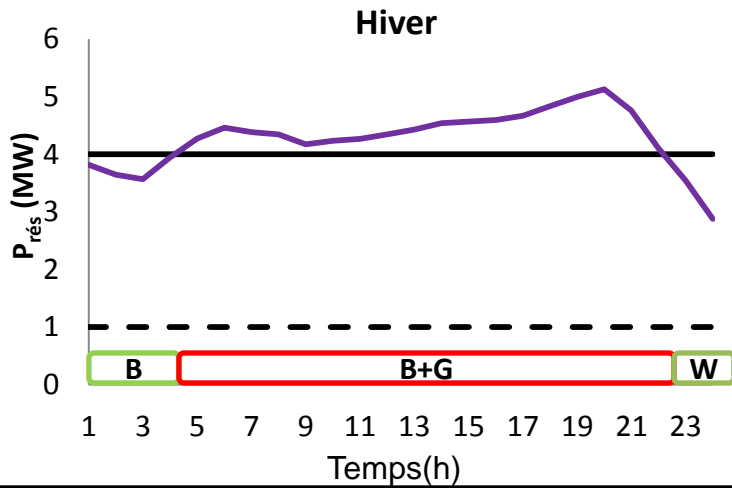


# Stratégie de dimensionnement

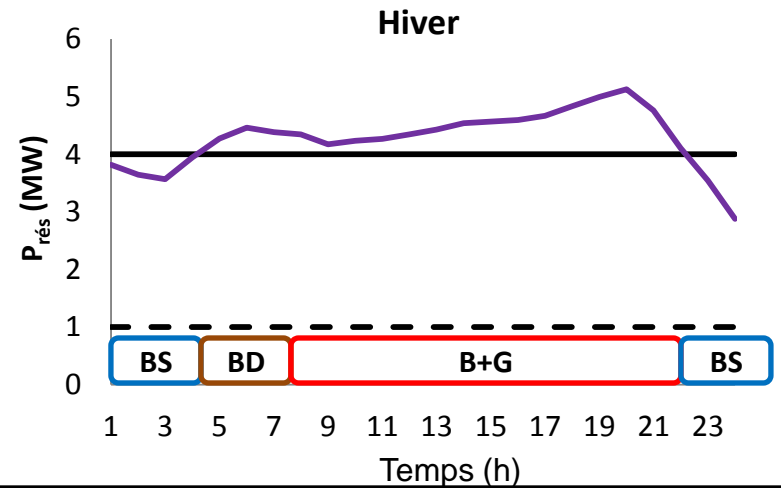


# Stratégie de gestion

Sans système de stockage



Avec système de stockage

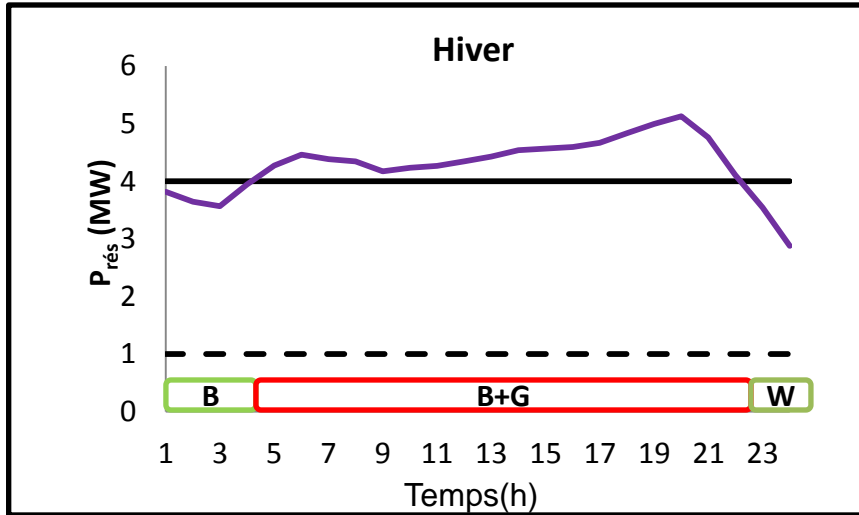


- B : Chaudière biomasse
- G : Chaudière gaz
- BS : Chaudière biomasse + Stockage
- BD : Chaudière biomasse + Déstockage

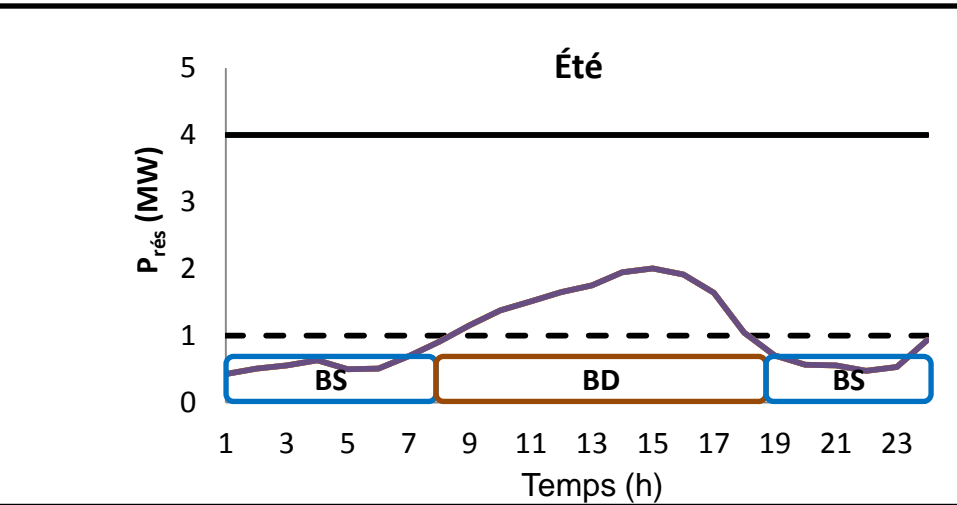
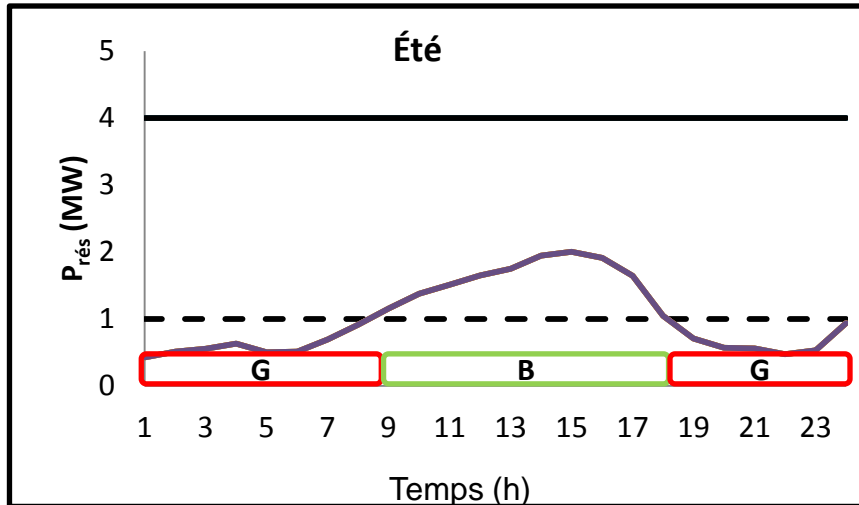
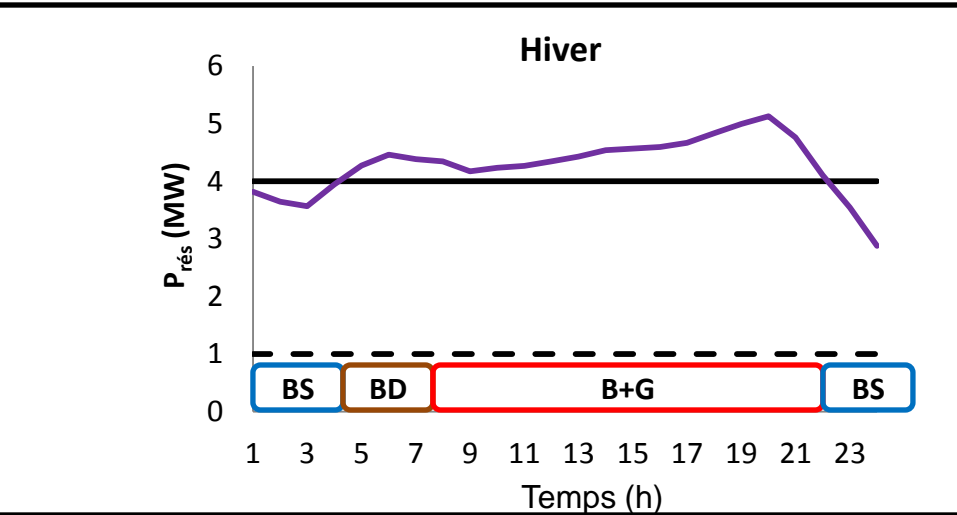
$P_{max}$  ———  
 $P_{min}$  - - -  
 $P_{rés}$  ———

# Stratégie de gestion

Sans système de stockage



Avec système de stockage

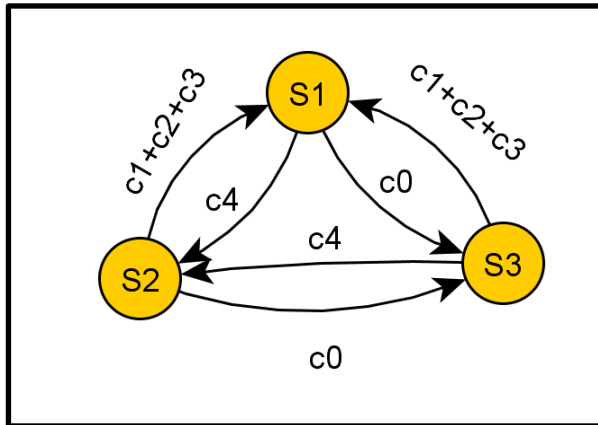


- B : Chaudière biomasse
- G : Chaudière gaz
- BS : Chaudière biomasse + Stockage
- BD : Chaudière biomasse + Déstockage

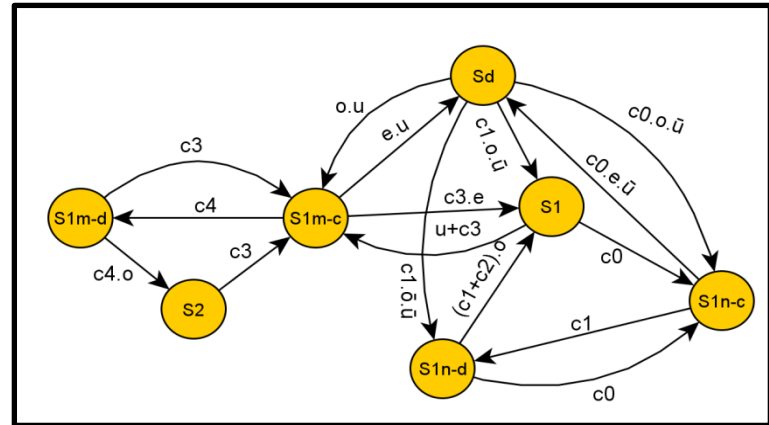
$P_{\max}$  ———  
 $P_{\min}$  - - -  
 $P_{\text{rés}}$  ———

# Stratégie de gestion

Sans système de stockage



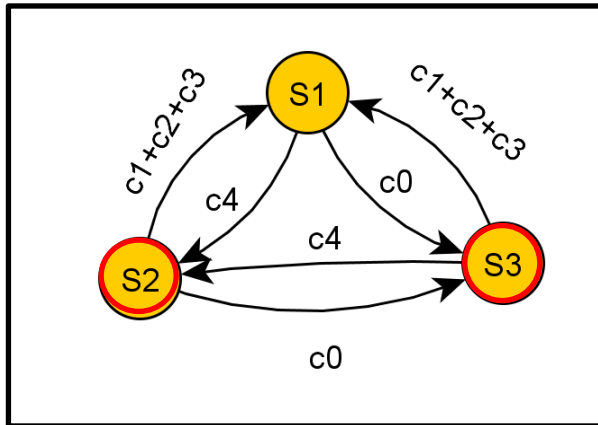
Avec système de stockage



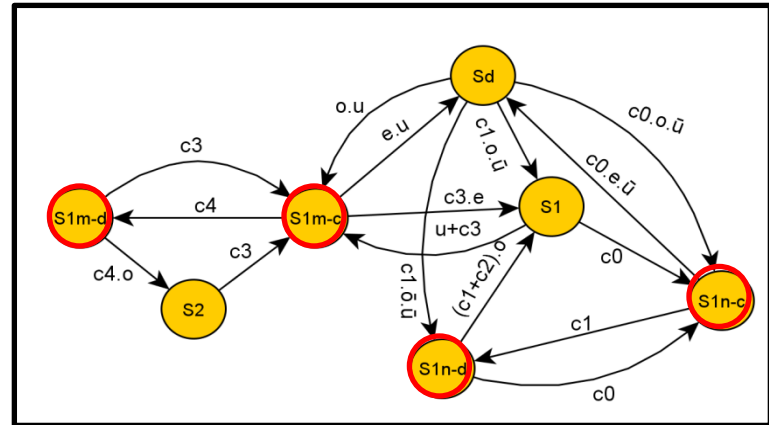
Etat	Action	Transition	Condition
S1	Chaudière biomasse	c0	$P_{rés} < P_{min}$
S2	Chaudière biomasse et chaudière gaz	c1	$P_{min} \leq P_{rés} \leq th_1$
S3	Chaudière gaz	c2	$th_1 \leq P_{rés} \leq th_2$
S1m-C	Chaudière biomasse à son maximum et stockage d'énergie	c3	$th_2 \leq P_{rés} \leq P_{max}$
S1m-d	Chaudière biomasse à son maximum et déstockage d'énergie	c4	$P_{rés} > P_{max}$
S1n-C	Chaudière biomasse à son minimum et stockage d'énergie	o	$E_{cum} = 0$
S1n-C	Chaudière biomasse à son minimum et déstockage d'énergie	e	$E_{cum} = E_{max}$
Sd	Déstockage d'énergie	u	Période d'été

# Stratégie de gestion

Sans système de stockage



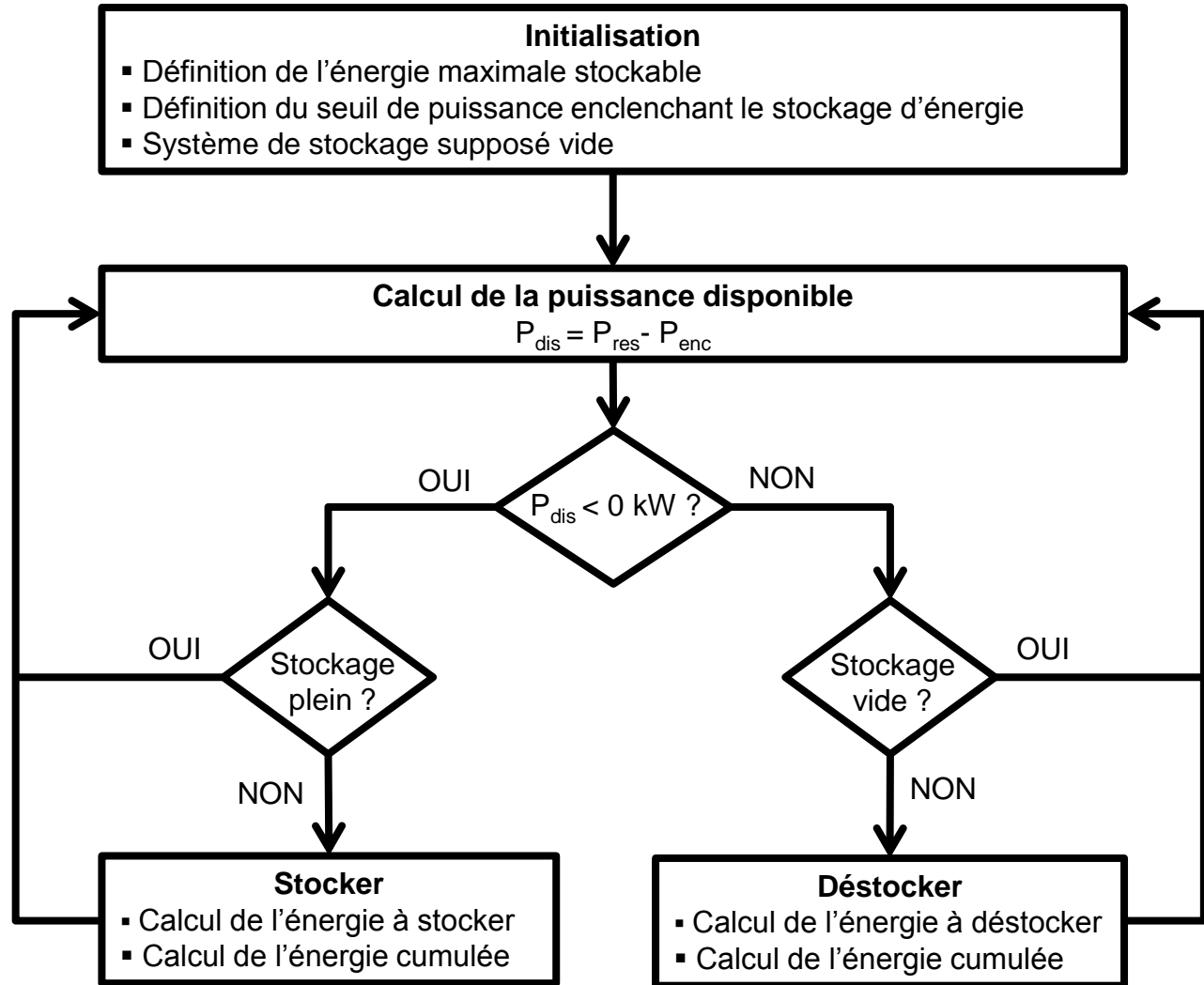
Avec système de stockage



Etat	Action	Transition	Condition
S1	Chaudière biomasse	c0	$P_{rés} < P_{min}$
S2	Chaudière biomasse et chaudière gaz	c1	$P_{min} \leq P_{rés} \leq th_1$
S3	Chaudière gaz	c2	$th_1 \leq P_{rés} \leq th_2$
S1m-C	Chaudière biomasse à son maximum et stockage d'énergie	c3	$th_2 \leq P_{rés} \leq P_{max}$
S1m-d	Chaudière biomasse à son maximum et déstockage d'énergie	c4	$P_{rés} > P_{max}$
S1n-C	Chaudière biomasse à son minimum et stockage d'énergie	o	$E_{cum} = 0$
S1n-C	Chaudière biomasse à son minimum et déstockage d'énergie	e	$E_{cum} = E_{max}$
Sd	Déstockage d'énergie	u	Période d'été

# Stratégie de gestion

Stratégie de gestion d'un système de stockage thermique par hydro-accumulation





# Stratégie de dimensionnement

## Étude paramétrique

- Évaluation de critères pour différents volumes du système de stockage
- Choix du volume optimal en optimisant un ou plusieurs critères

- **Critère énergétique** : Taux de couverture bois

$$T_{\text{bois}} = E_{\text{bois}} / (E_{\text{bois}} + E_{\text{gaz}})$$

- **Critère économique** : Gain total réalisé

$$G = (D_{\text{exp}} - \text{TRB}) \times E_c$$

$E_{\text{bois}}$  : énergie bois annuelle consommée

$E_{\text{gaz}}$  : énergie gaz annuelle consommée

$D_{\text{exp}}$  : durée d'exploitation

$\text{TRB}$  : Temps de Retour Brut sur investissement

$E_c$  : gain économique annuel

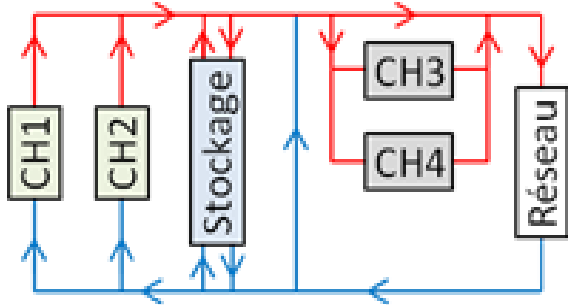
$T_{\text{bois-c}}$  : taux de couverture bois contractuel (92%)

## Problème d'optimisation

$$\max_V (G) \quad \text{tel que} \quad \begin{cases} V \in [V_{\min}; V_{\max}] \\ T_{\text{bois}}(V) \geq T_{\text{bois-c}} \end{cases}$$

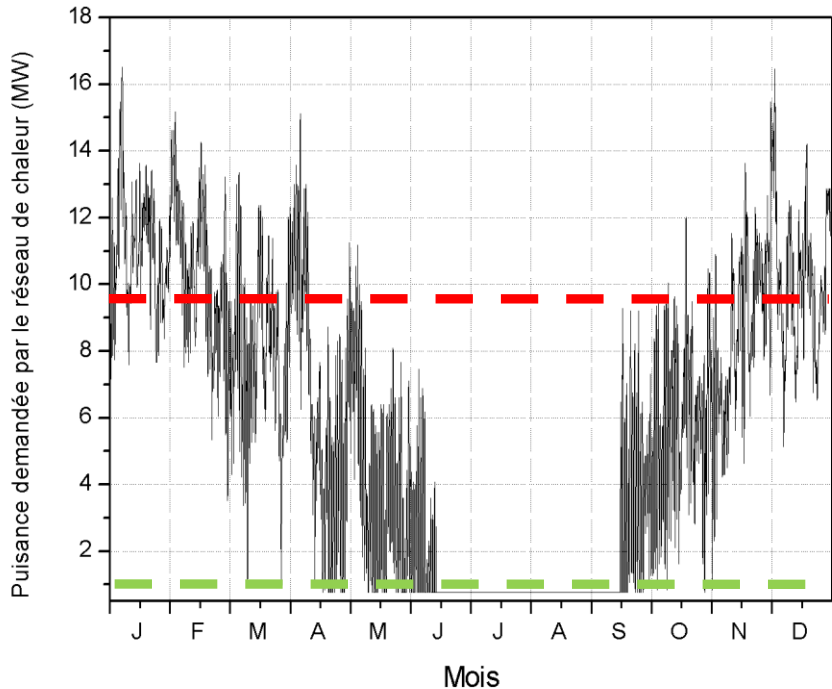
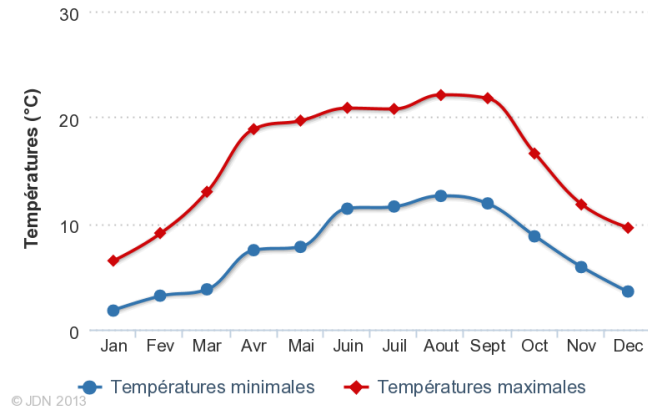
# Un cas d'étude : la chaufferie de Maromme

Synoptique



Élément	Caractéristiques
CH1	[2160 7200] kW
CH2	[750 2500] kW
CH3	7200 kW
CH4	9700 kW
Stockage	À définir

Données 2011 (source : JDN d'après Météo France)

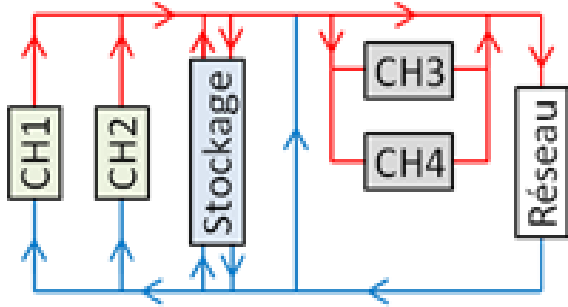


GAZ+ BOIS  
BOIS

- $0,78 \text{ MW} < P_{\text{res}} < 16,5 \text{ MW}$
- Chaudière gaz utilisée l'hiver
- 2 chaudières bois utilisées en mi-saison
- 1 seule chaudière bois utilisée l'été

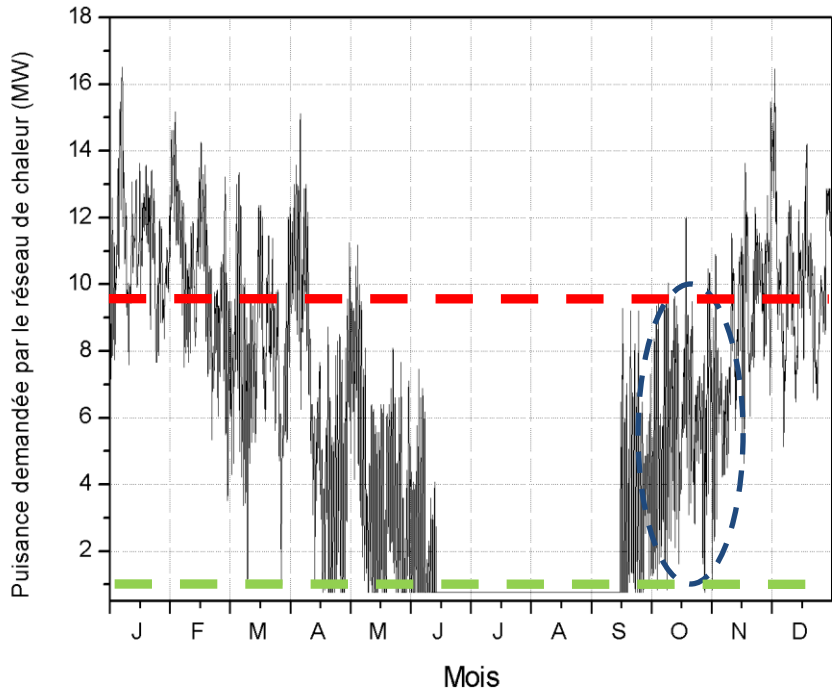
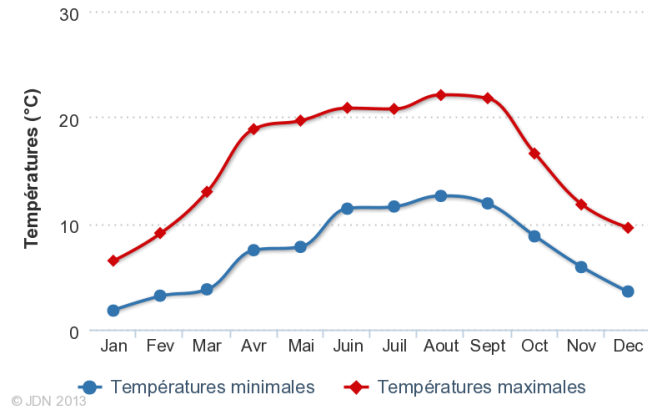
# Un cas d'étude : la chaufferie de Maromme

Synoptique



Élément	Caractéristiques
CH1	[2160 7200] kW
CH2	[750 2500] kW
CH3	7200 kW
CH4	9700 kW
Stockage	À définir

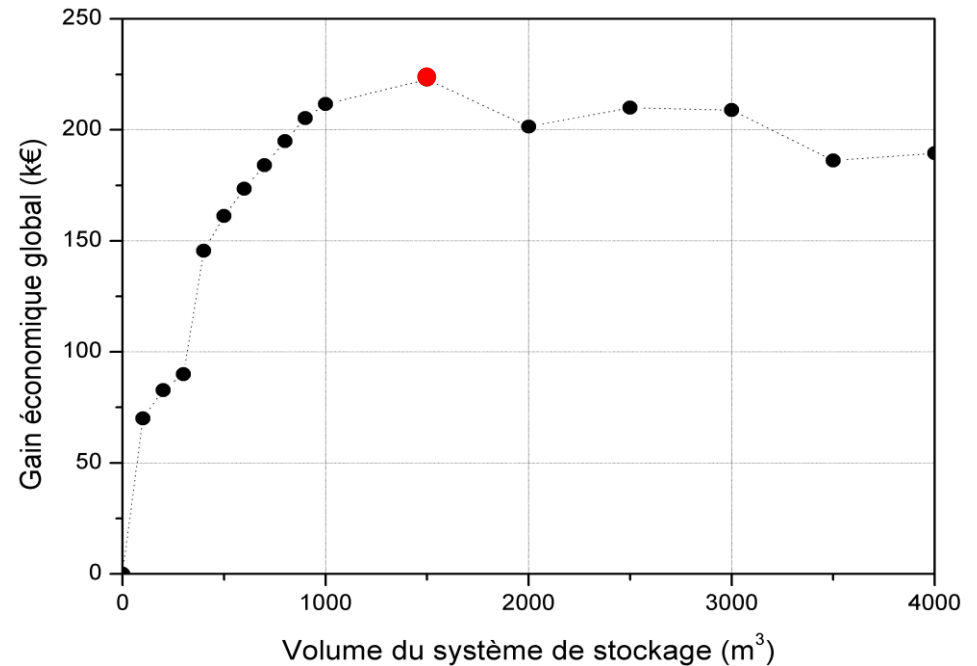
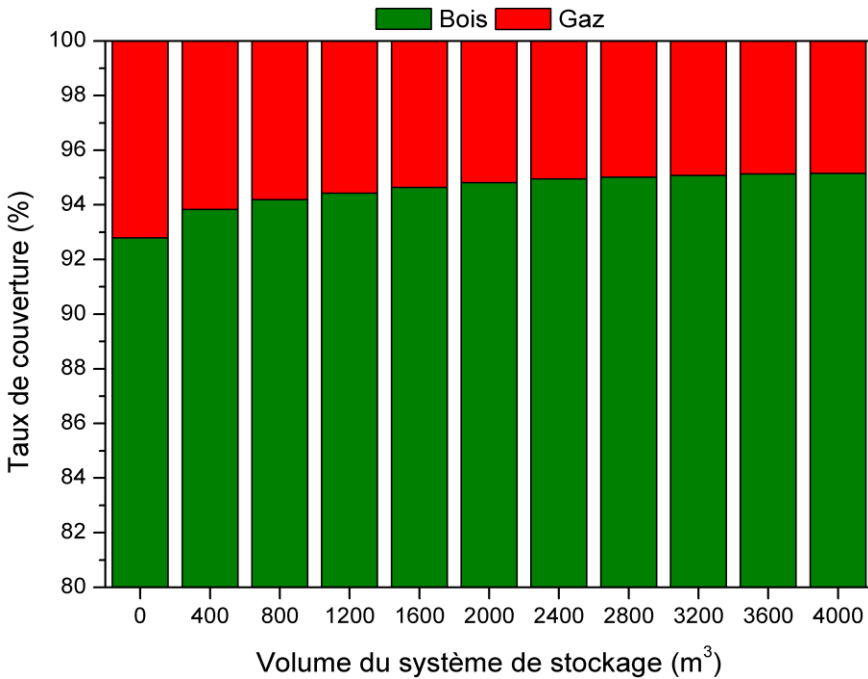
Données 2011 (source : JDN d'après Météo France)



GAZ+ BOIS  
BOIS

- $0,78 \text{ MW} < P_{\text{res}} < 16,5 \text{ MW}$
- Chaudière gaz utilisée l'hiver
- 2 chaudières bois utilisées en mi-saison
- 1 seule chaudière bois utilisée l'été

# Un cas d'étude : la chaufferie de Maromme

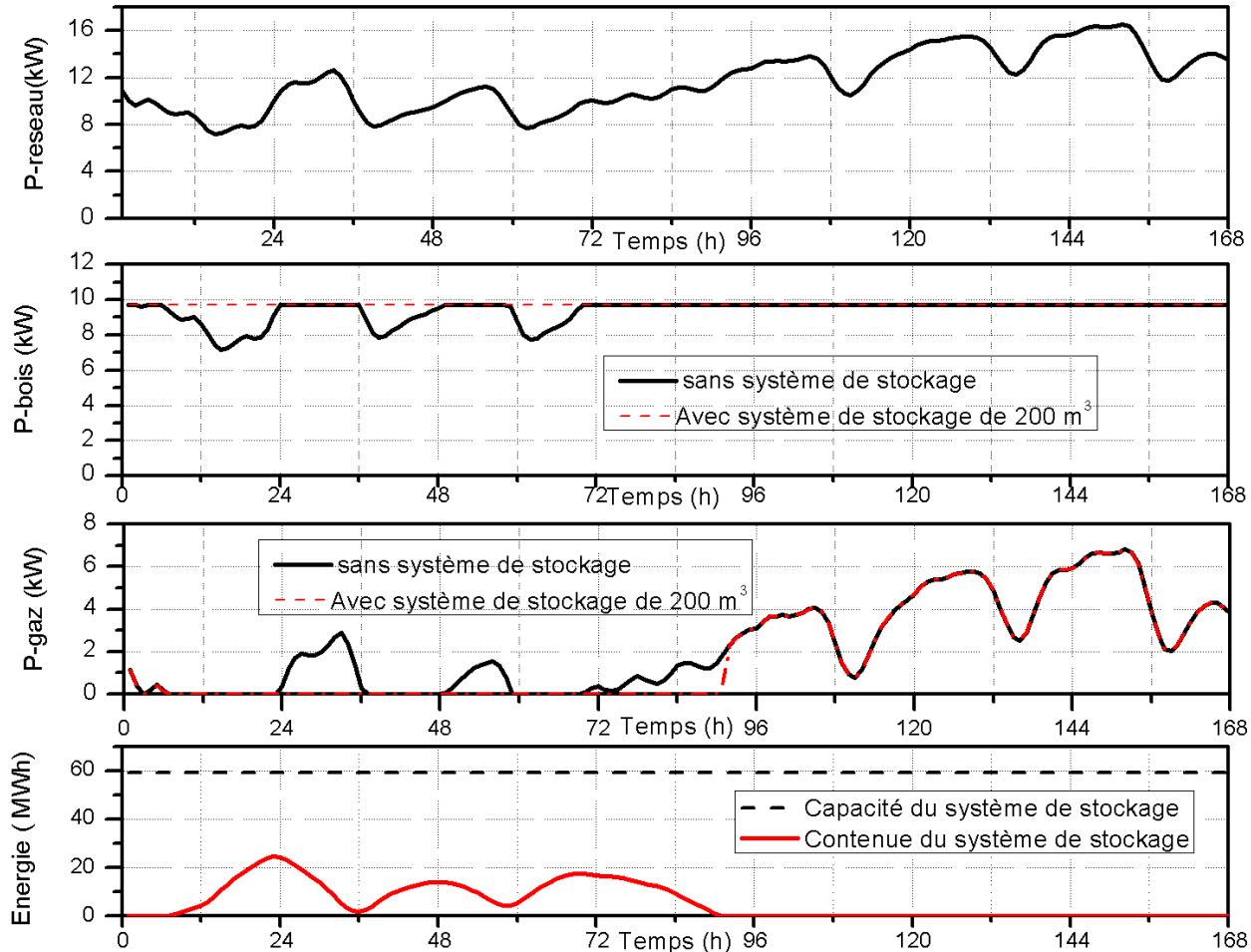


- Taux de couverture bois sans stockage > Taux contractuel (92 %)
- Taux de couverture bois augmente avec le volume de stockage
- Stagnation : ressources disponibles limitées

- Augmentation des économies avec le volume de stockage
- Gain total max → volume de 1500 m<sup>3</sup>

# Un cas d'étude : la chaufferie de Maromme

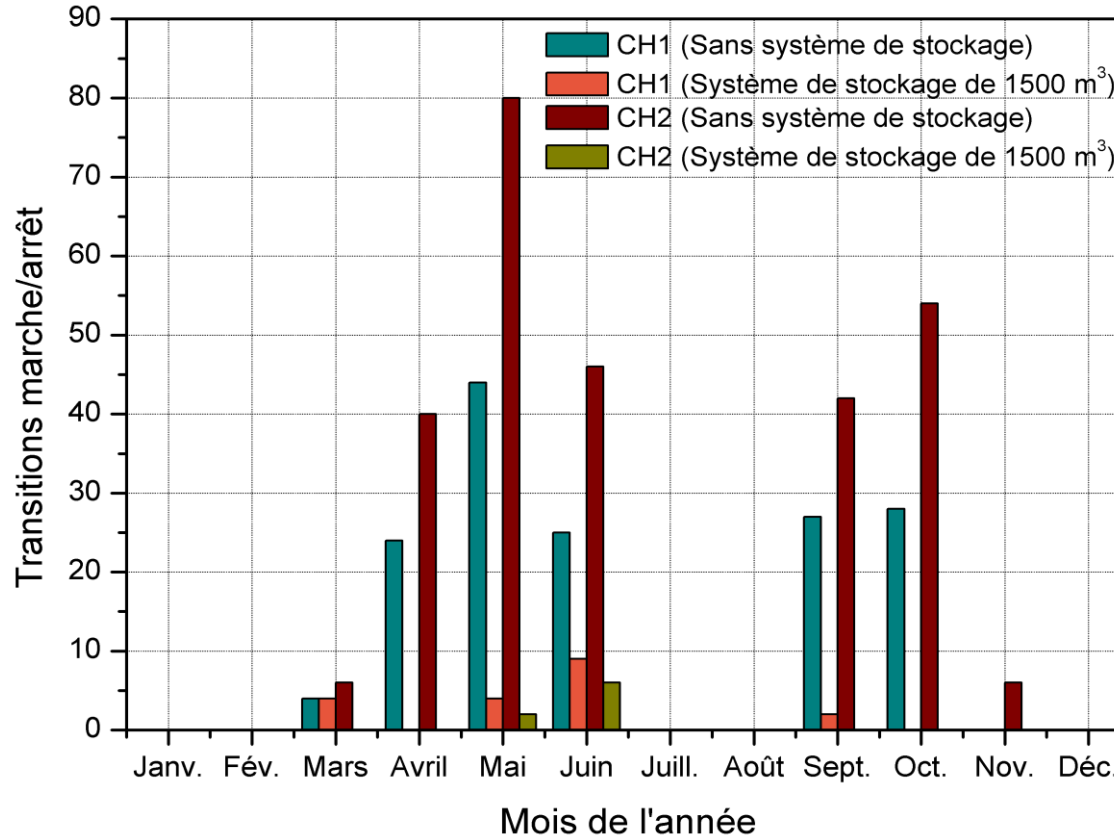
Impact du système de stockage sur le fonctionnement de la chaufferie (période d'hiver)



- Réduction de l'utilisation des chaudières gaz → Réalisation d'économies
- Fonctionnement des chaudières bois le plus souvent à leurs puissance maximale → Amélioration du rendement

# Un cas d'étude : la chaufferie de Maromme

## Impact du système de stockage sur la dynamique des chaudières biomasses

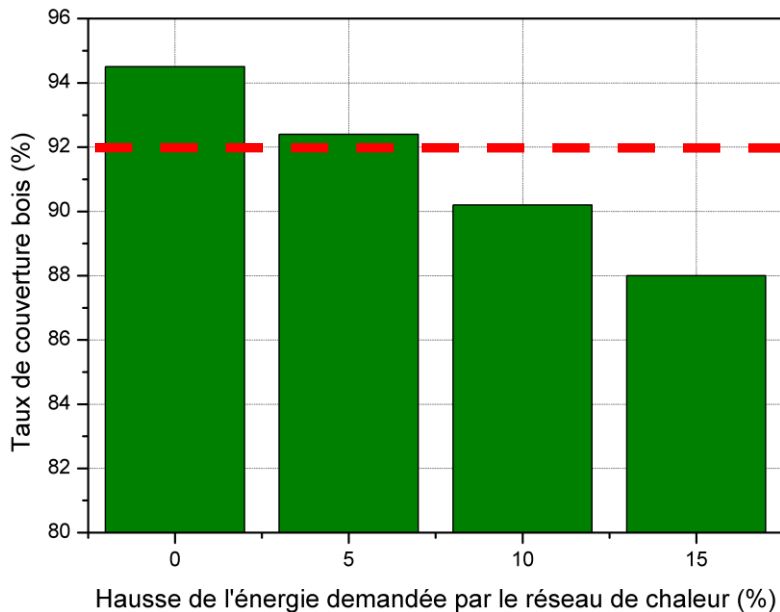


- Diminution du nombre de transitions marche / arrêt  
→ Amélioration des performances des chaudières biomasses

# Un cas d'étude : la chaufferie de Maromme

## Résultats de l'étude comparative

Chaufferie	N	T <sub>bois</sub> [%]	Ec [k€]	TRB [a]	G [k€]
Sans système de stockage	344	92,7	0	0	0
Avec système de stockage de 1500 m <sup>3</sup>	24	94,5	18	12	223



Satisfaction du taux de couverture bois contractuel (92 %) avec un volume de stockage optimal de 1500 m<sup>3</sup> :  
→ Augmentation des besoins du réseau de chaleur < 5 %.

# Conclusions et perspectives

## SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Cas d'étude	Maromme
Situation géographique	Nord
Durée d'exploitation (années)	24
Énergie annuelle demandée (MWh)	60
Volume optimal du système de stockage (m <sup>3</sup> )	1500
Taux de couverture bois sans système de stockage (%)	92,7
Taux de couverture bois avec système de stockage (%)	94,61
Prix (k€)	212
Gain économique annuel (k€)	18
Gain économique global (k€)	432
Temps de retour brut sur investissement (années)	12

- Testé en simulation, sur d'autres sites, l'outil développé démontre qu'il est possible d'obtenir, par un choix optimal du volume du système de stockage, une économie financière significative sur la durée d'exploitation
- Outil utilisé actuellement par Cofely pour étudier la possibilité d'installer des systèmes de stockage thermique



# Conclusions et perspectives

## TRAVAUX EN COURS ET FUTURS

- Améliorer la modélisation du système :
  - Modéliser la dynamique des chaudières (rendement énergétique variable et inertie)
  - Modéliser la stratification thermique au sein du système de stockage
  
- Développer une stratégie de contrôle prédictive :
  - Anticiper les besoins du réseau de chaleur
  - Gérer le stockage et le déstockage d'énergie de façon optimale
  
- Outil généraliste :
  - Gérer et dimensionner correctement l'ensemble des chaufferies collectives du parc Cofely GDF-Suez

# DIMENSIONNEMENT ET GESTION D'UN SYSTÈME DE STOCKAGE THERMIQUE PAR HYDRO- ACCUMULATION : APPLICATION À LA CHAUFFERIE MULTI-ÉNERGIE DE MAROMME

COFELY GDF-Suez / PROMES-CNRS  
/ Université de Perpignan Via Domitia

Mouchira LABIDI, Julien EYNARD, Olivier FAUGEROUX et Stéphane GRIEU

5èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS  
11-12 juillet 2013



UPVD  
Université de Perpignan Via Domitia

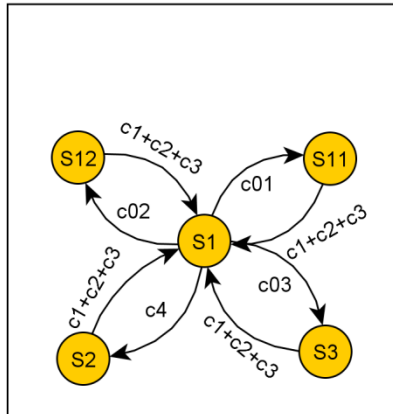


## RÉSULTATS DE L'ÉTUDE COMPARATIVE

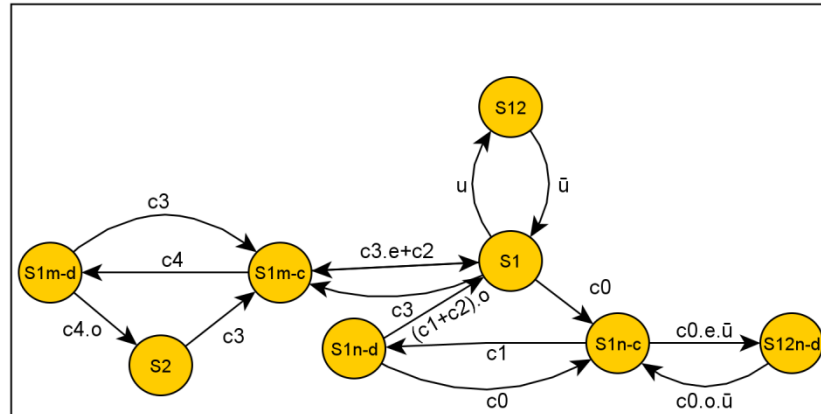
<b>Cas d'étude</b>	<b>Maromme</b>	<b>Colomiers</b>
Situation géographique	Nord	Sud
Durée d'exploitation (années)	24	25
Énergie annuelle demandée (MWh)	60	16
Volume optimal du système de stockage (m <sup>3</sup> )	1500	200
Taux de couverture bois sans système de stockage (%)	92,7	85
Taux de couverture bois avec système de stockage (%)	94,61	98,72
Prix (k€)	212	98
Gain économique annuel (k€)	18	48,3
Gain économique global (k€)	432	1109,5
Temps de retour brut sur investissement (années)	12	2

# Cas d'étude 1 : approche de gestion

Sans système de stockage



Avec système de stockage



État	Fonctionnement
S1	CH1+CH2
S1n-c	CH1+CH2 (min) +S
S1n-d	CH1+CH2 (min) +D
S11	CH1
S12	CH2
S2	CH1+CH2+CH3
S3	CH3

Transition	Condition
c0	Pres<2910
c01	2500<Pres<2910
c02	750<Pres<2500
c03	Pres<750
c1	2910<Pres<4660
c2	4660<Pres<6000
c3	6000<Pres<9700
c4	Pres>9700
e	Ecum=Emax
o	Ecum=0
u	Été