

# *Analyse de la flexibilité des usages électriques résidentiels*

## Application aux usages thermiques

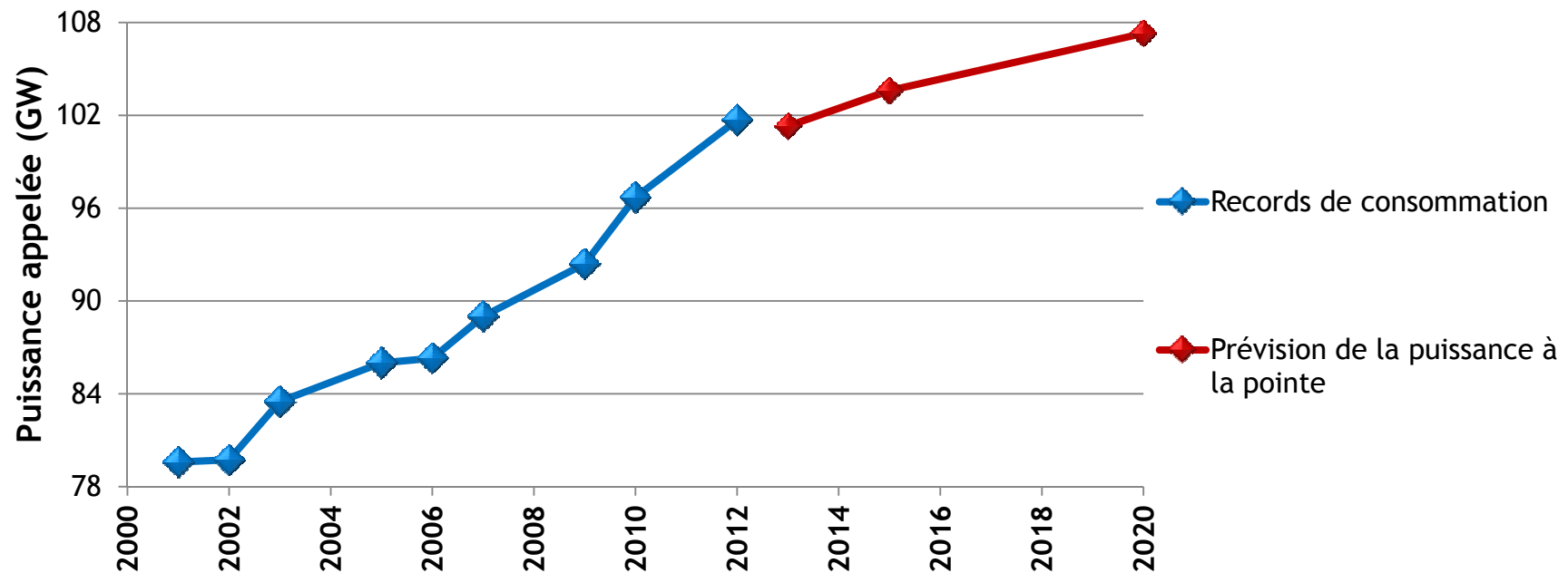
Doctorant: David DA SILVA

Encadrement : - Jérôme ADNOT

- Bruno DUPLESSIS

# Contexte

Aujourd'hui on observe une augmentation des pointes électriques et du risque de défaillance [RTE, 2011]



## Causes :

- Les pointes augmentent plus vite que la consommation
- Manque d'investissements dans les moyens de production de pointe

# Contexte

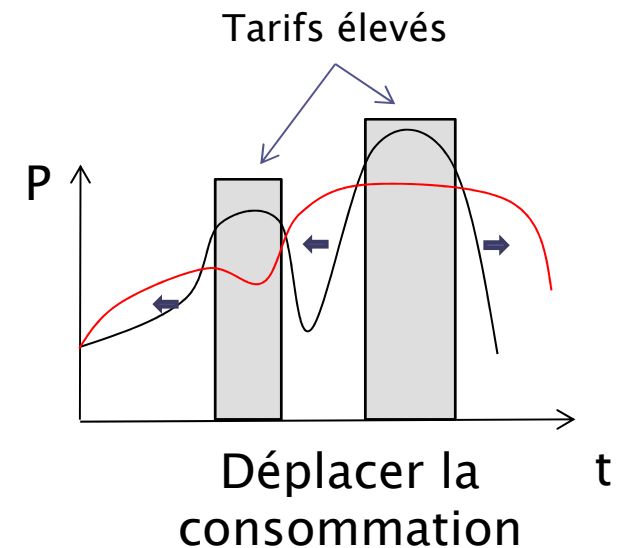
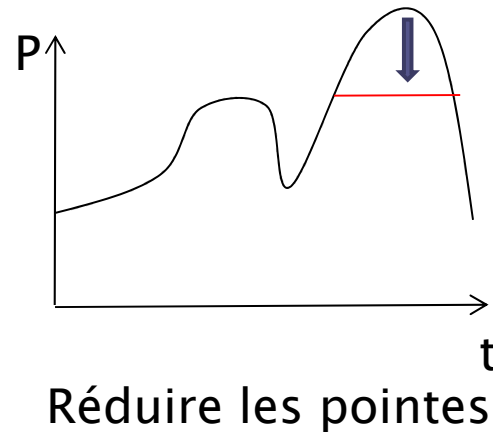
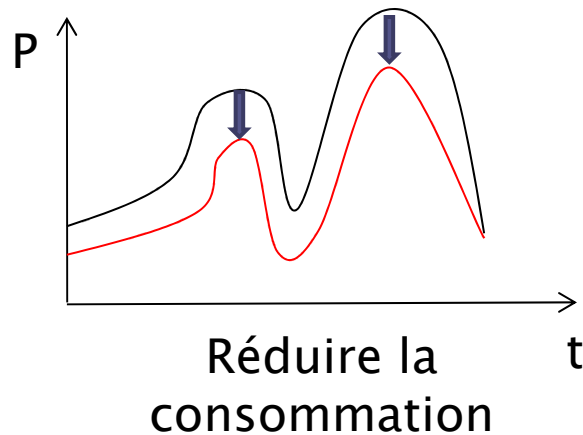
La meilleure réponse à l'augmentation de la demande en électricité est un compromis entre la maîtrise de la pointe et l'augmentation des capacités.

La Gestion de la Demande ➡ Permettra d'optimiser le réseau électrique

*Secteur Résidentiel* peu exploré et représentant jusqu'à 29% de la consommation électrique totale en Europe

# Contexte

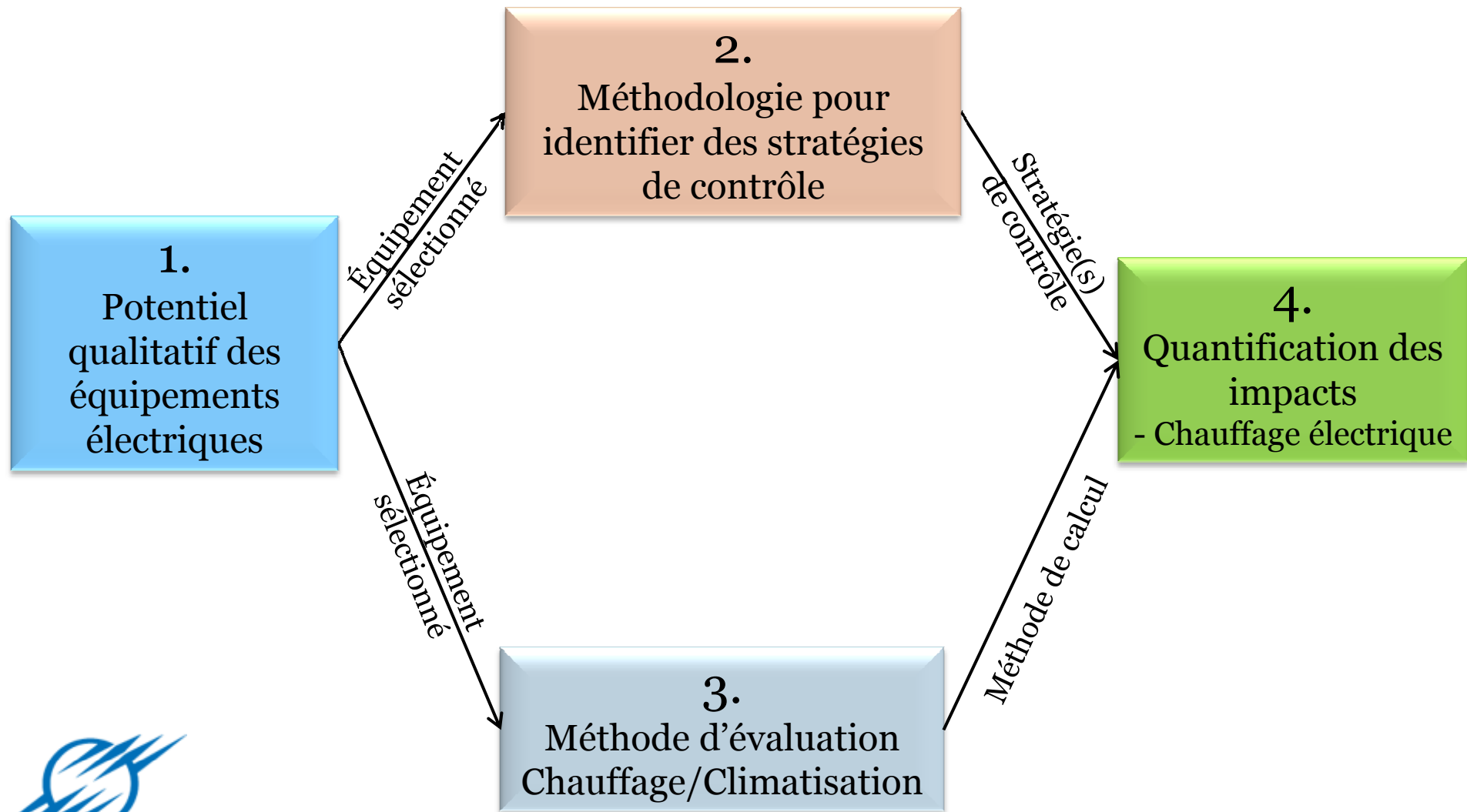
La Gestion de la Demande (GD) peut agir sur la consommation de 3 façons différentes:



## Modes de mise en œuvre:

- Signaux de prix (« *Time of use Pricing* », « *Real time pricing* »)
- Contrôle à distance

# Démarche de la thèse



# Démarche de la thèse



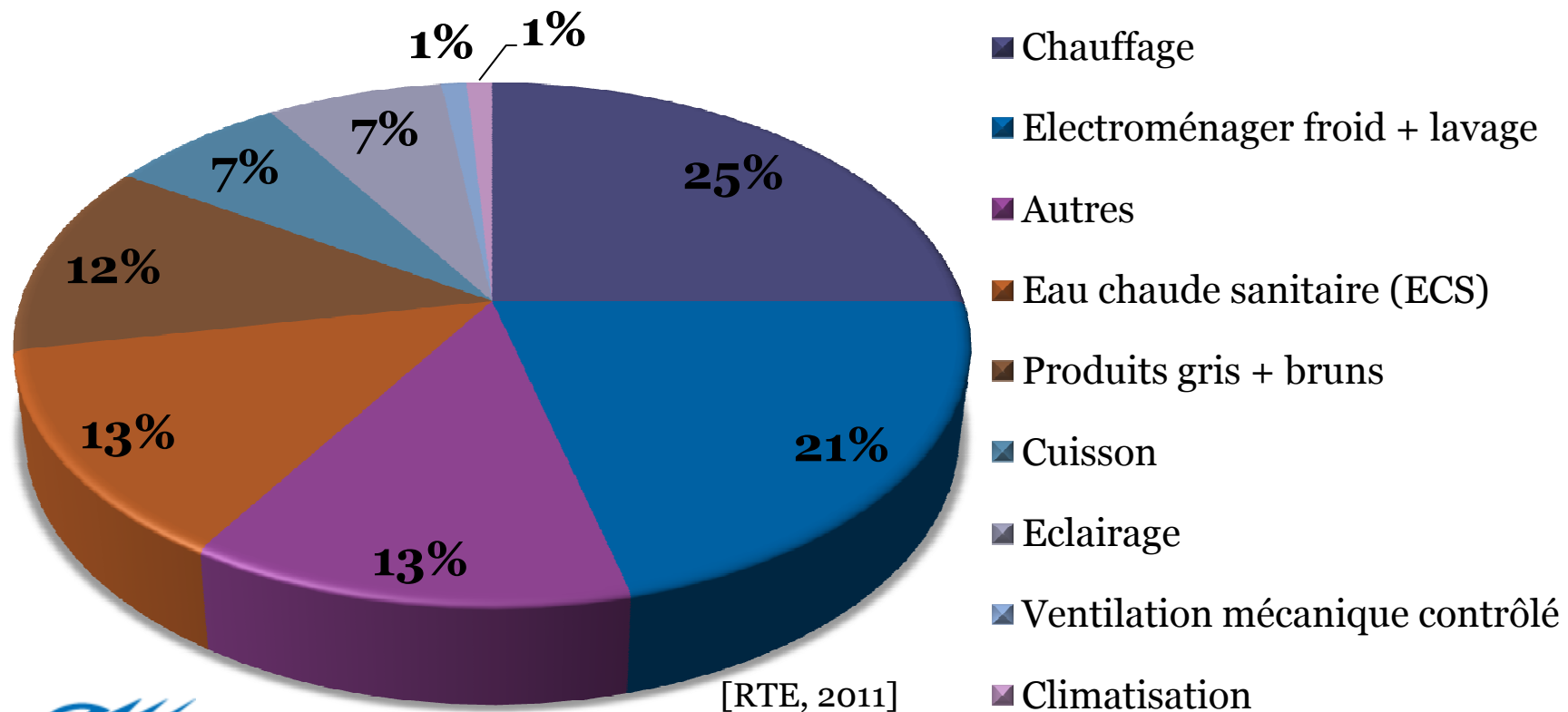
# 1. Potentiel qualitatif des équipements électriques

**Objectif:** Présélection des équipements résidentiels à privilégier pour la gestion de la demande

- Forte consommation globale
- Contribution aux pointes électriques
- Fort taux de pénétration
- Possibilité de décalage du fonctionnement (capacité de stockage?)
- Disponibilité de solutions (Etat de l'art)

# 1. Potentiel qualitatif des équipements électriques

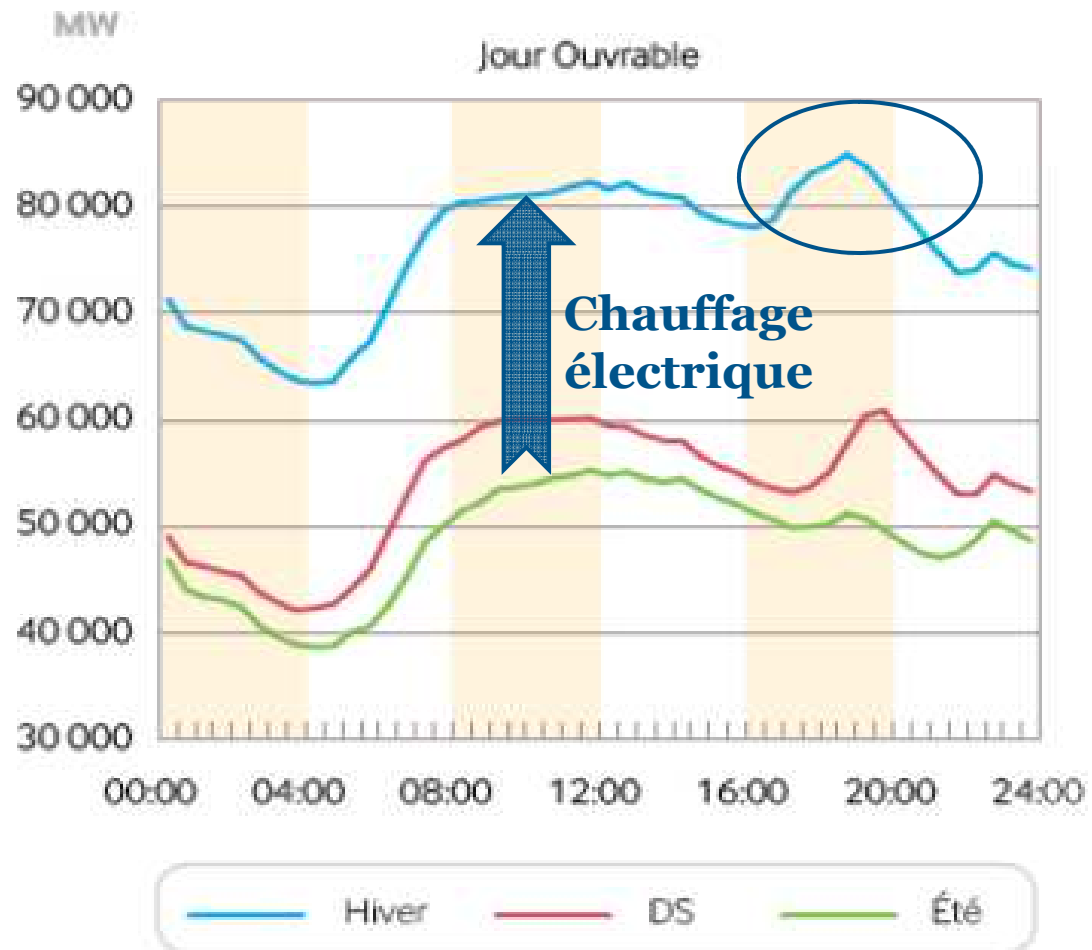
## Consommation usages résidentiels





# 1. Potentiel qualitatif des équipements électriques

- Pointe Saisonnière  
Gradient thermique  
2300 MW/K
- Pointe journalière



[RTE, 2011]

## Chauffage électrique

# 1. Potentiel qualitatif des équipements électriques

## Etat de l'art - gestion de la demande: Chauffage/Climatisation

[Reddy,1991]

$$\frac{C dT_i(t)}{dt} = L[T_a(t) - T_i(t)] + Q_a(t) - Q_c(t)$$

Avec,

C – Capacité thermique du bâtiment

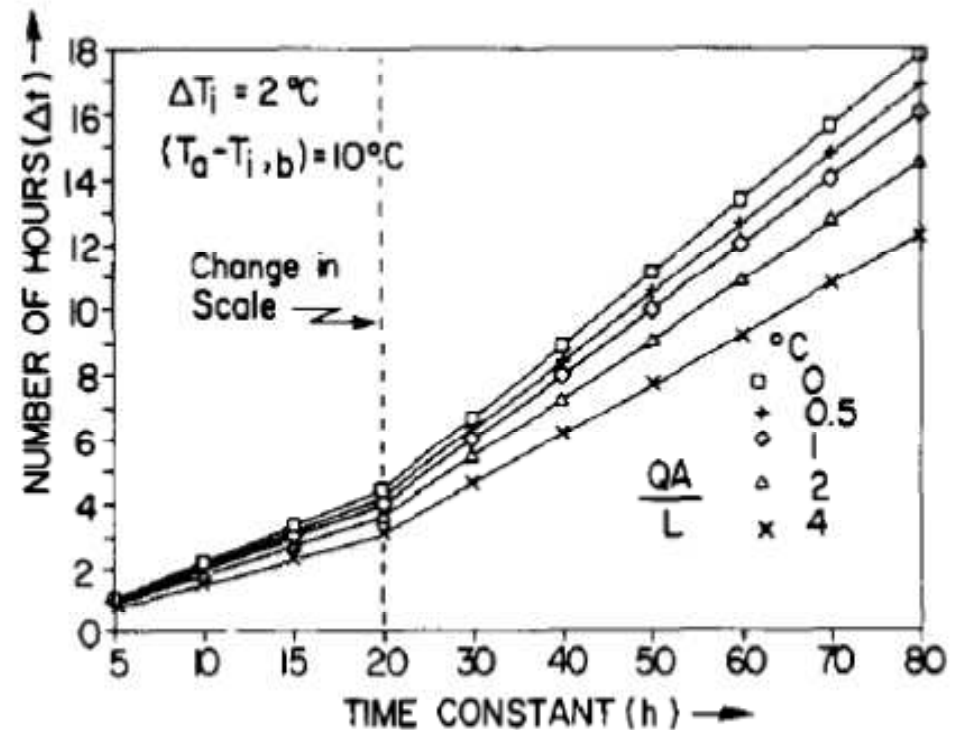
L – Coefficient de pertes thermiques du bâtiment

$T_i(t)$  – Température interne

$T_a(t)$  – Température extérieure

$Q_a(t)$  – Somme de tous les gains internes

$Q_c(t)$  – Energie thermique enlevée par le climatiseur



### Limites :

- Modèle de bâtiment très simple
- Evaluation du confort imprécise
- Peu relié aux possibilités de contrôle

# 1. Potentiel qualitatif des équipements électriques

## Etat de l'art - gestion de la demande: Chauffage/Climatisation

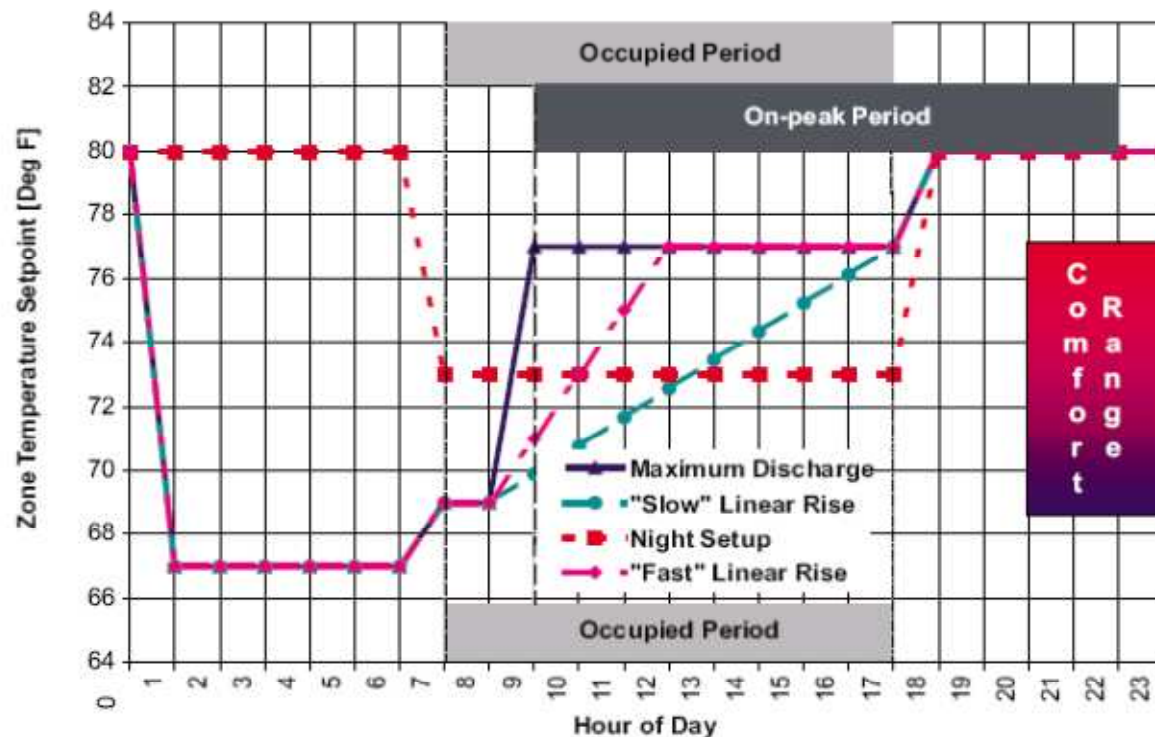
- Optimisation de la consigne de température:

- Structures tarifaires et profils d'occupation connus a priori

- Secteur Tertiaire

### Limites des études

- Analyse des conditions de fonctionnement du bâtiment...)
- Calcul au pas de temps de la problématique



[Braun, 2003]

enne  
raire

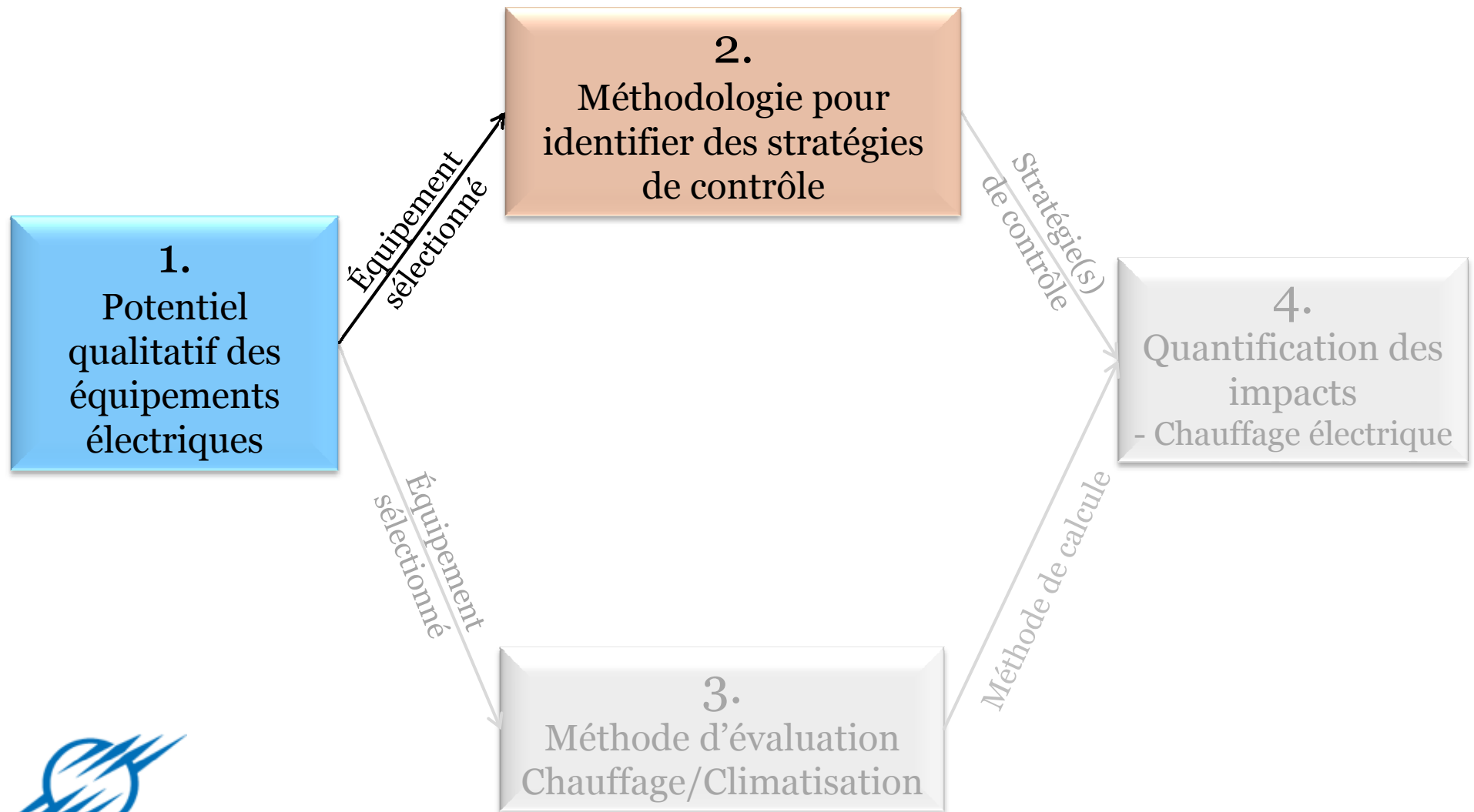
# 1. Potentiel qualitatif des équipements électriques

	Partie de la consommation globale	Utilisation pendant les pointes	Puissance appelée	Taux de pénétration	Capacité de stockage ?
<i>Chauffage électrique</i>	+++	++	+++	+++	Oui*
<i>Climatisation</i>	••	++	+++	••	Oui*
<i>ECS</i>	++	••	++	++	Oui
<i>Machine à laver</i>	+	++	+	+++	Non
<i>Congélateur/ réfrigérateur</i>	+	++	••	+++	Oui*

\* Faisant appel à des éléments secondaires avec inertie

Légende	
+++	Très grand
++	Grand
+	Moyen
•	Petit
••	Très petit

# Démarche de la thèse



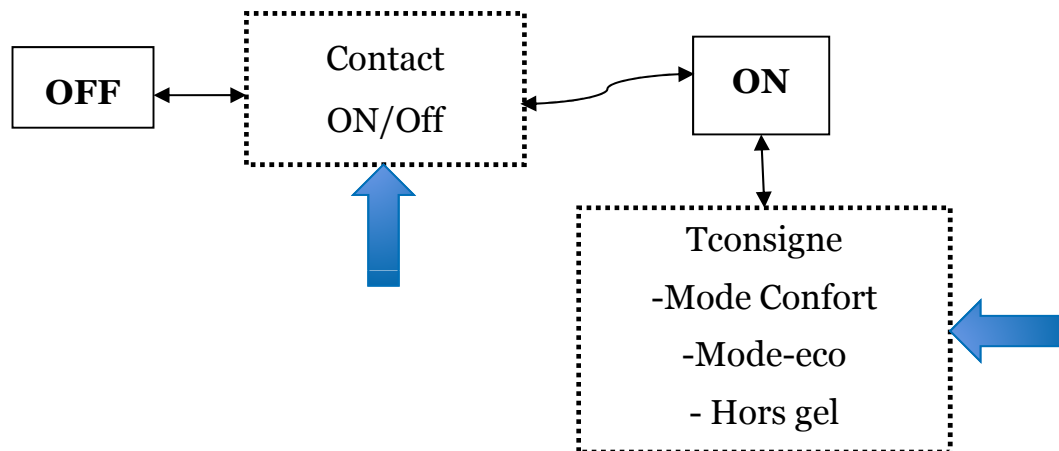
## 2.Méthodologie pour identifier des stratégies de contrôle

### Objectifs

- Mettre en évidence les stratégies de contrôle d'un équipement
  - Simple et intuitive
  - Basée sur une représentation graphique
    - ILCA« **I**dentification of **L**oad **C**ontrol **A**vailability »
- **1<sup>er</sup> Niveau** - Contrôles existants dans l'équipement (accessibles à l'utilisateur)
- **2<sup>ème</sup> Niveau** - Stratégies de contrôles avancées

## 2.Méthodologie pour identifier des stratégies de contrôle

### Convecteur électrique – 1<sup>er</sup> Niveau

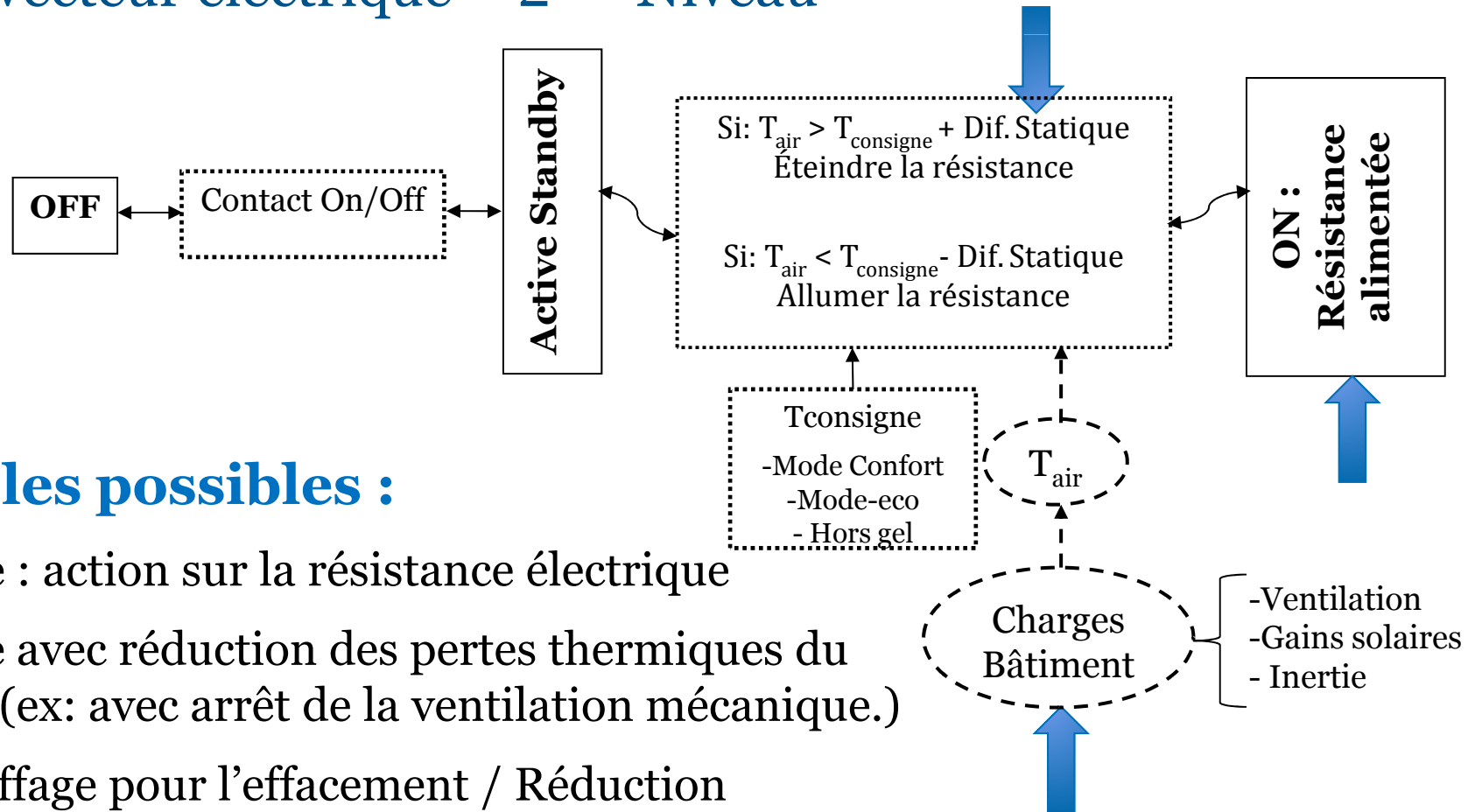


### Contrôles possibles :

- Coupure : action sur le contact On/Off
- Modification consigne de température

## 2.Méthodologie pour identifier des stratégies de contrôle

### Convecteur électrique – 2<sup>ème</sup> Niveau



### Contrôles possibles :

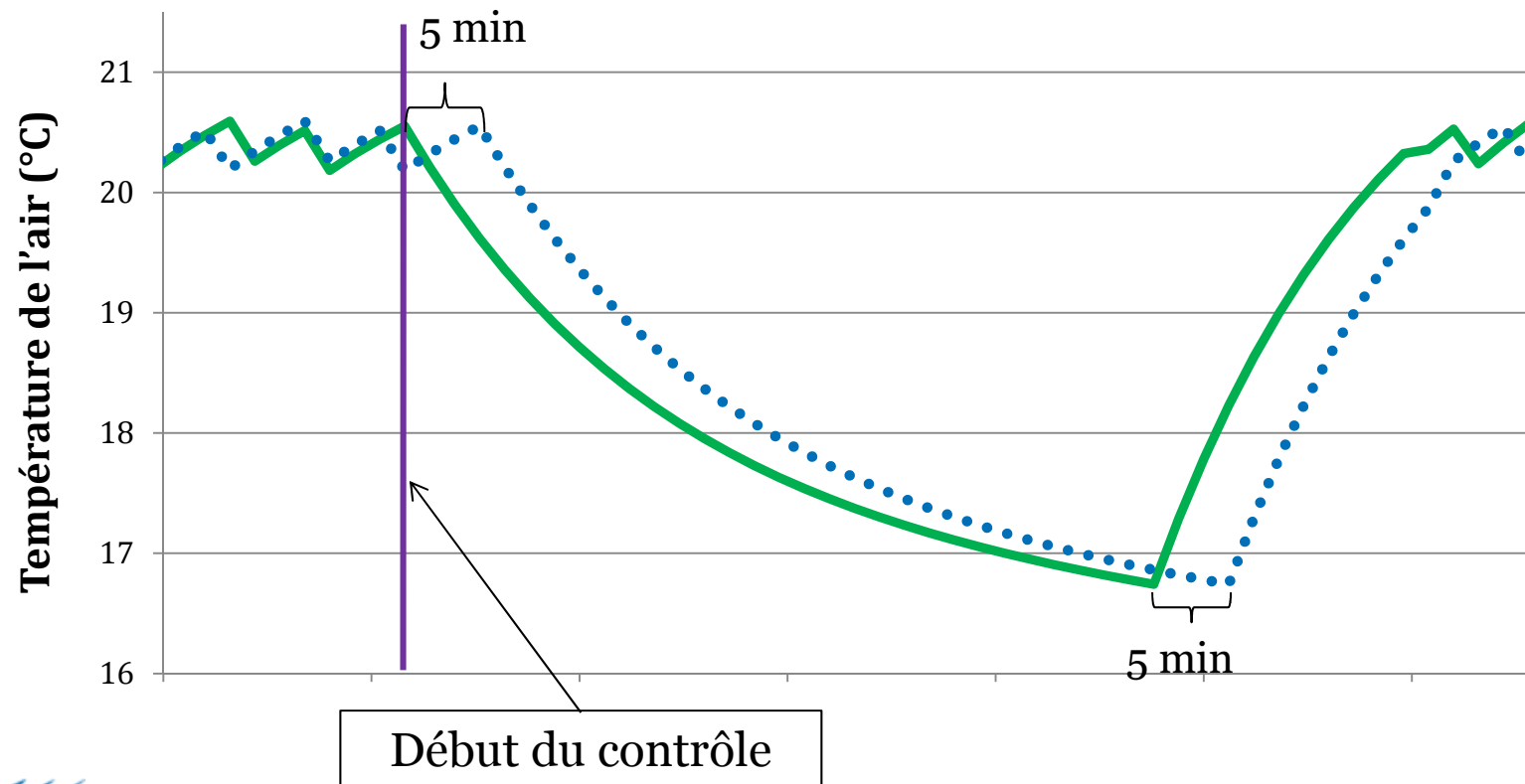
- Coupure : action sur la résistance électrique
- Coupure avec réduction des pertes thermiques du bâtiment (ex: avec arrêt de la ventilation mécanique.)
- Préchauffage pour l'effacement / Réduction consigne
- Coupure – différentiel statique (« bande morte »)



## 2.Méthodologie pour identifier des stratégies de contrôle

Stratégie innovante :

- Coupure avec condition de bande morte



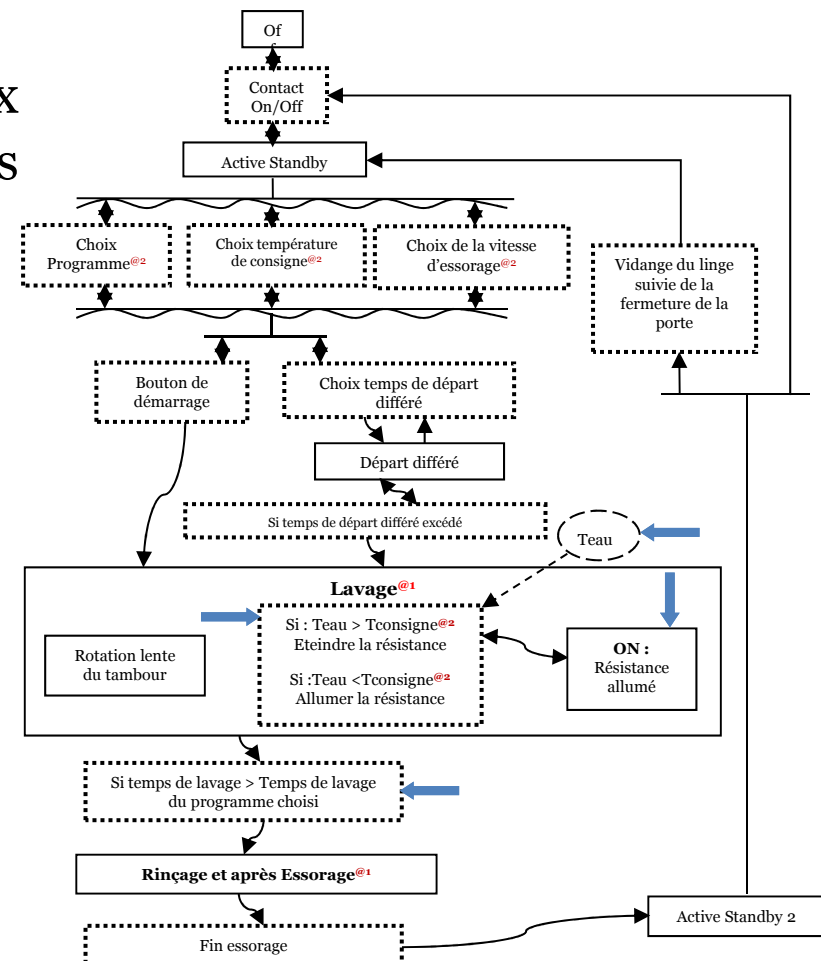
## 2.Méthodologie pour identifier des stratégies de contrôle

- Application de la méthodologie aux différents équipements électriques résidentiels
- Tester le potentiel du langage utilisé

*Pas besoin de simulation/étude thermique pour l'analyse de la flexibilité*

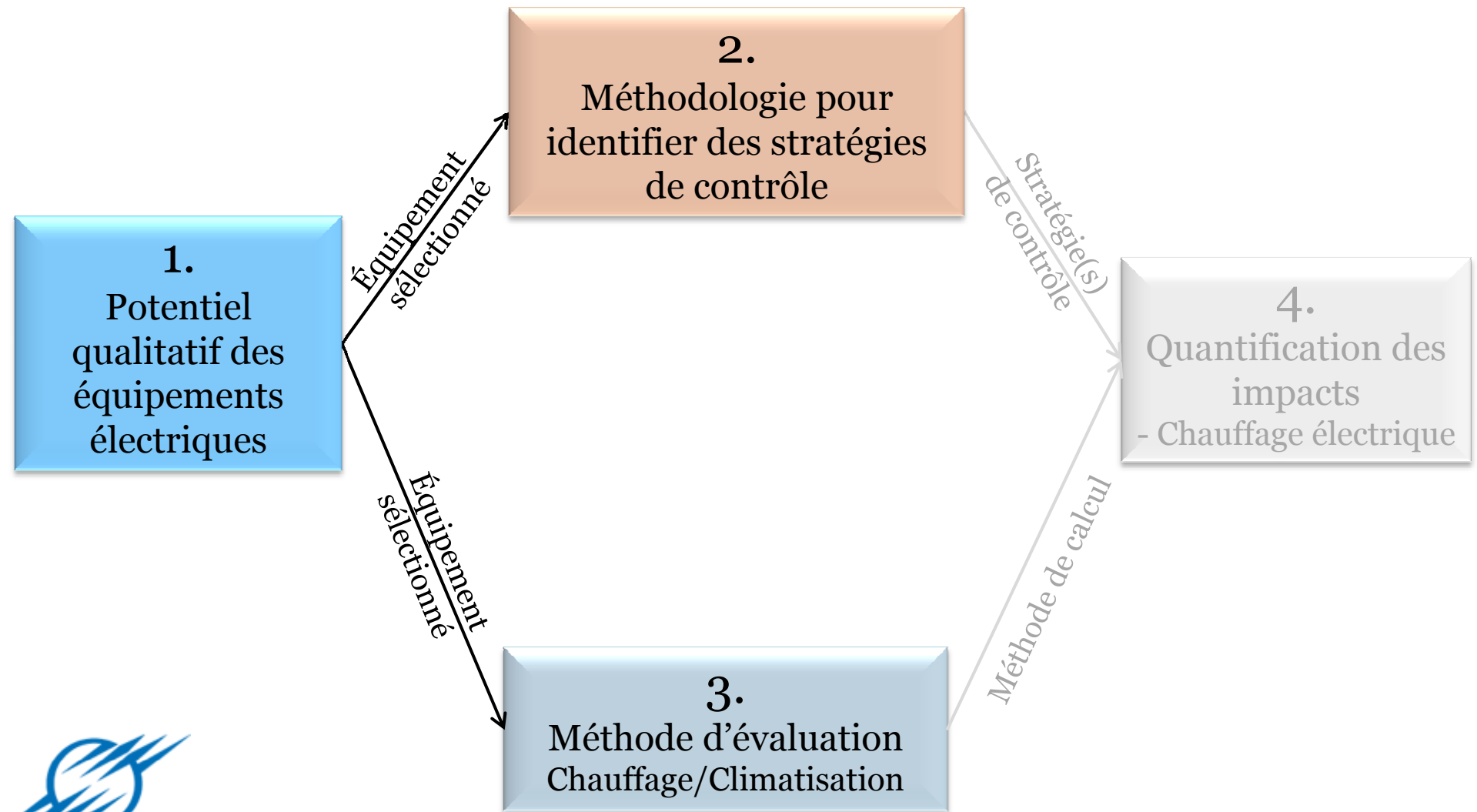
Stratégies basées :

- Décalage du fonctionnement
- Arrêt temporaire du cycle



Machine à laver

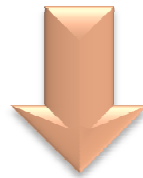
# Démarche de la thèse



### 3. Méthode d'évaluation

#### Quantification de la valeur du pilotage :

- Quelles sont les gains énergétiques et monétaires pour le consommateur ?
- Comment la courbe de charge sera modifiée ?
- Quels effets négatifs du pilotage (confort, recouvrement...)



Simulation Dynamique

### 3. Méthode d'évaluation

#### Outils de simulation

Besoins	Exigences
Bonne évaluation du confort thermique	Précision du calcul
Décrire le comportement de systèmes de chauffage	Petits pas de temps de simulation
Simulation des groupes de bâtiments	Temps total de simulation faible

### 3. Méthode d'évaluation

#### Outils de simulation existants

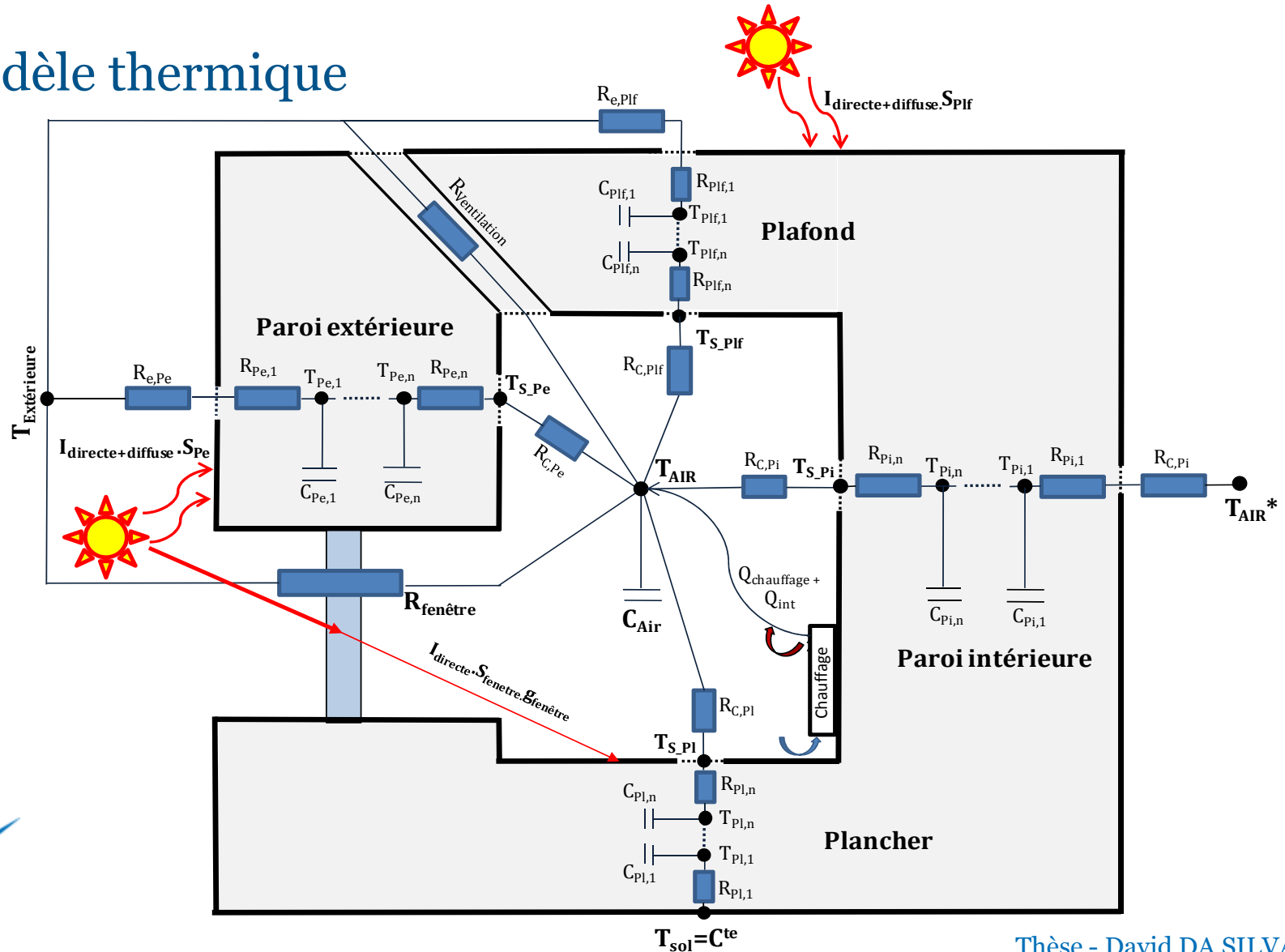
Logiciel existants	Précision	Temps de calcul
Logiciels plus répandus (TRNSYS, EnergyPlus)	Bonne (pas valide pour des petits pas de temps)	Petit (long pour des calculs par des DF)
Différences finies (Conduction)	Bonne	Long
Modèles « RC »	Faible – Bonne	Petit
Modèles « RC » Optimisés	Bonne	Long

#### Modèle retenu :

- Modèle « RC »
- Conduction des parois basée sur des différences finies
- Application d'une technique de réduction [Moore, 1981]
- Echanges radiatifs de grande longueur d'onde – [Steinman, 1989]

### 3. Méthode d'évaluation

#### Modèle thermique



### 3. Méthode d'évaluation

#### Contraintes de confort\* (acceptabilité)

Bâtiments résidentiels	Catégorie	Indice équivalent PPD (%)	Plage de température opérative** (°C) (Hiver)
Bâtiments d'habitation : pièces de séjour (chambres, séjour, cuisine, etc.)	I	<6	21-25
	II	<10	20-25
	III	<15	18-25

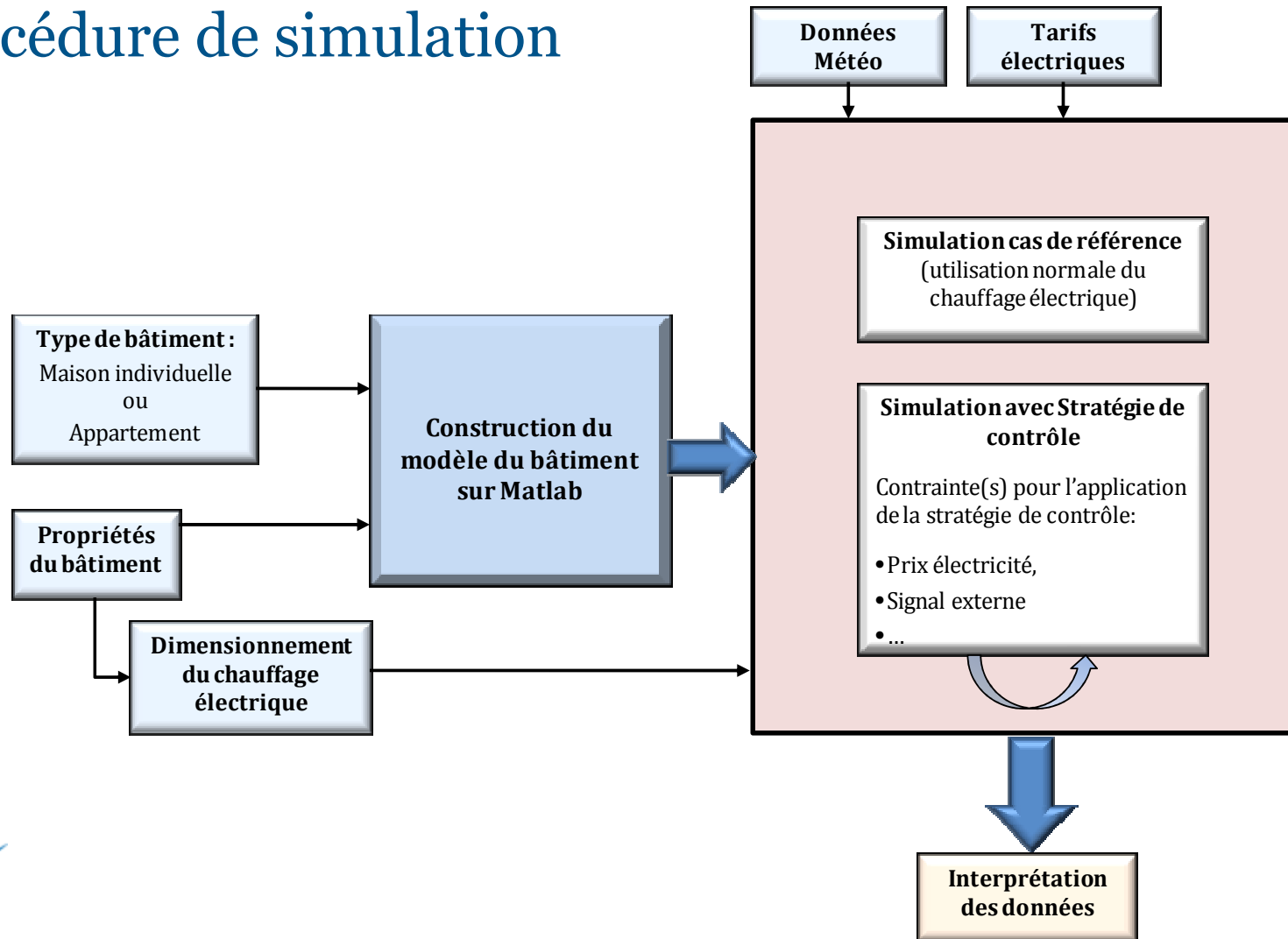
\*Norme EN 15251

\*\*Température opérative =  $\frac{T_{murs} + T_{air}}{2}$



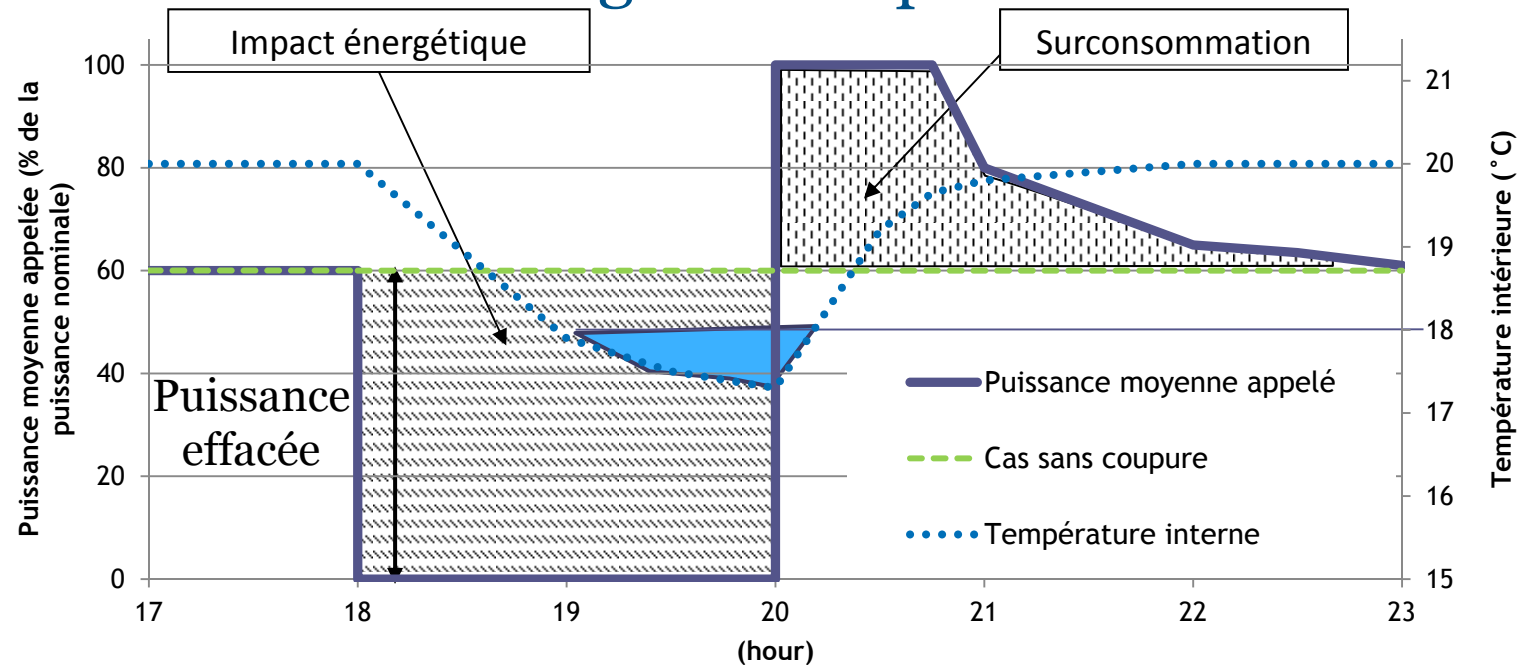
### 3. Méthode d'évaluation

#### Procédure de simulation



### 3. Méthode d'évaluation

#### Indicateurs – Chauffage électrique



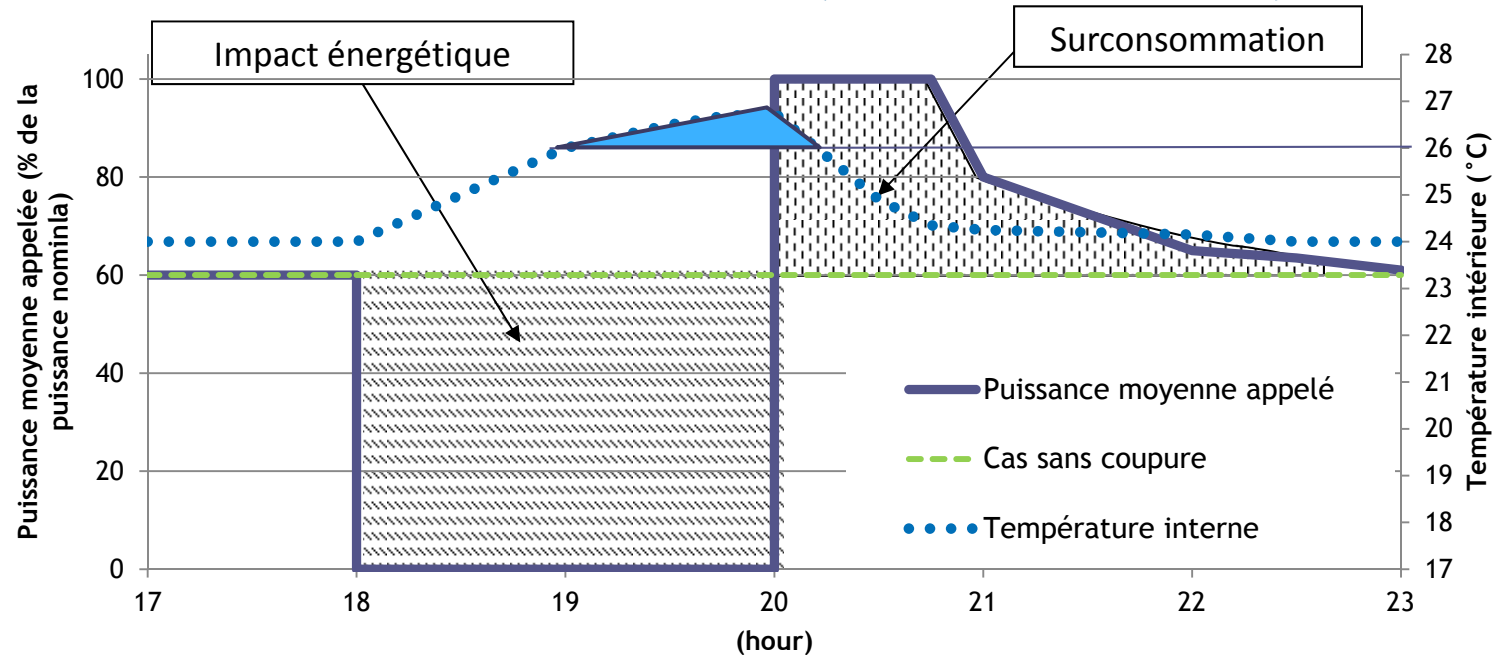
$$\text{Recouvrement (\%)} = \frac{\text{Surconsommation}}{\text{Impact énergétique}} \times 100$$

$$\text{Degrés-heures d'inconfort (DH)} = \int \text{Max}[(T_{\text{Limite\_de\_la\_zone\_de\_confort}} - T_{\text{op}}), 0] dt$$

Temps hors confort (min) – temps passé dehors de la zone de confort

### 3. Méthode d'évaluation

#### Indicateurs – Climatisation (PALENC 2010)

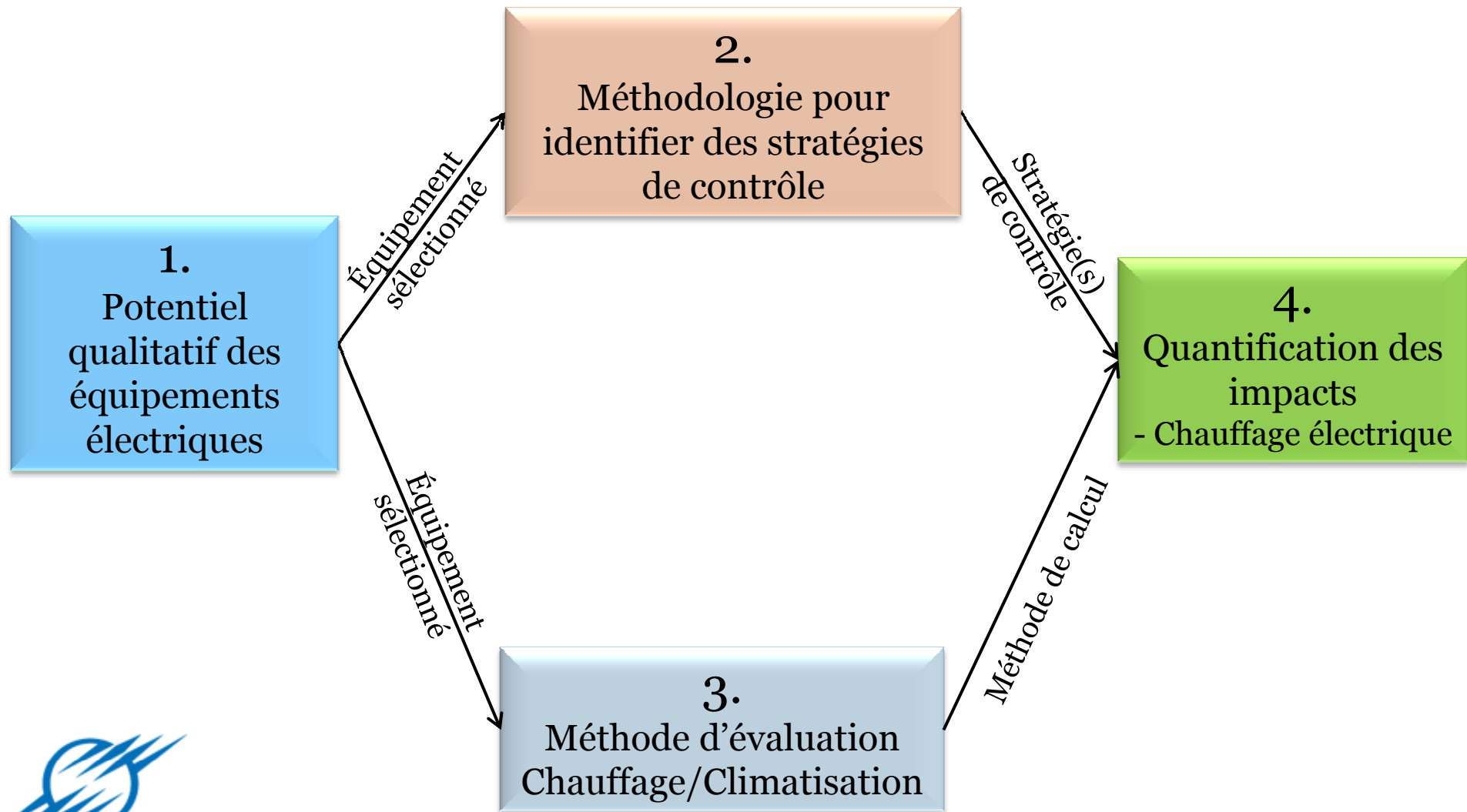


$$\text{Recouvrement (\%)} = \frac{\text{Surconsommation}}{\text{Impact énergétique}} \times 100$$

$$\text{Degrés-heures d'inconfort (DH)} = \int \text{Max}[(T_{\text{Limite\_de\_la\_zone\_de\_confort}} - T_{\text{op}}), 0] dt$$

Temps hors confort (min) – temps passé dehors de la zone de confort

# Démarche de la thèse



## 4. Quantification du potentiel

### Chauffage électrique

- Analyse des stratégies de contrôle
  - Individuel
  - Groupe de bâtiments
- Bénéfices monétaires (consommateur)

## 4. Quantification du potentiel

### Stratégies de contrôle

Coupure du chauffage

Coupure du chauffage avec réduction  
des charges du bâtiment

Réduction de la consigne de  
température

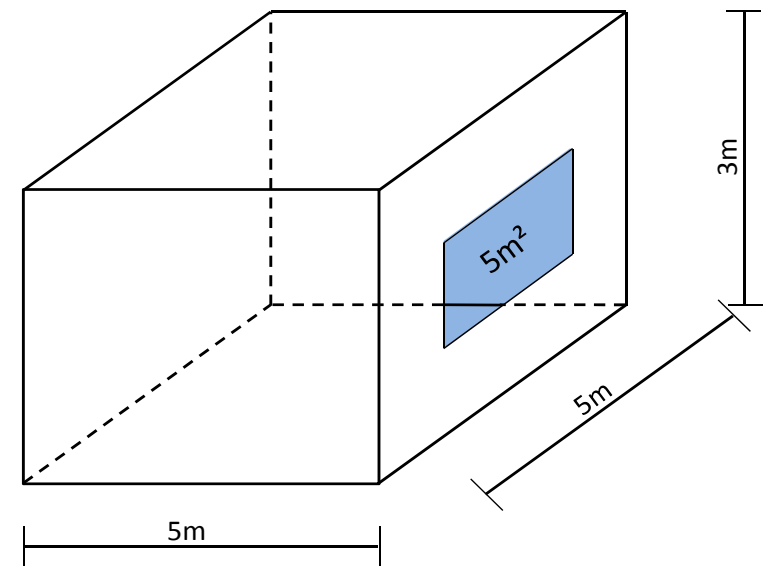
Coupure avec préchauffage

Coupure avec cond. bande morte

## 4. Quantification du potentiel

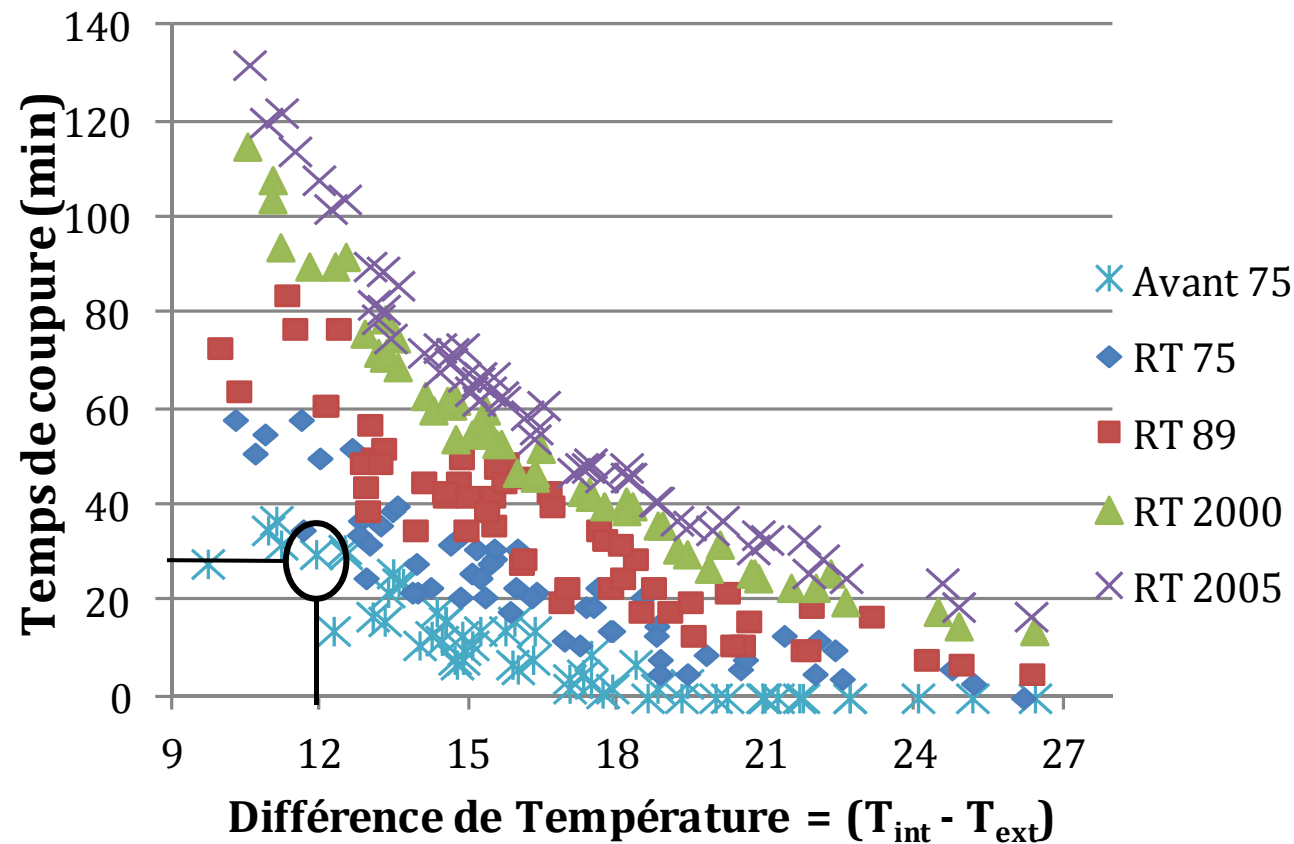
### Caractéristiques des bâtiments simulés :

- 2 types de logements : Appartement et maison individuelle
- Cinq périodes constructives:
  - Avant 1975
  - RT 1975
  - RT 1989
  - RT 2000
  - RT 2005
- Consigne constante sur  $T_{\text{air}} = 21,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Isolation par l'intérieur (Parois verticales)
- Données météorologiques de « Trappes »



## 4. Quantification du potentiel

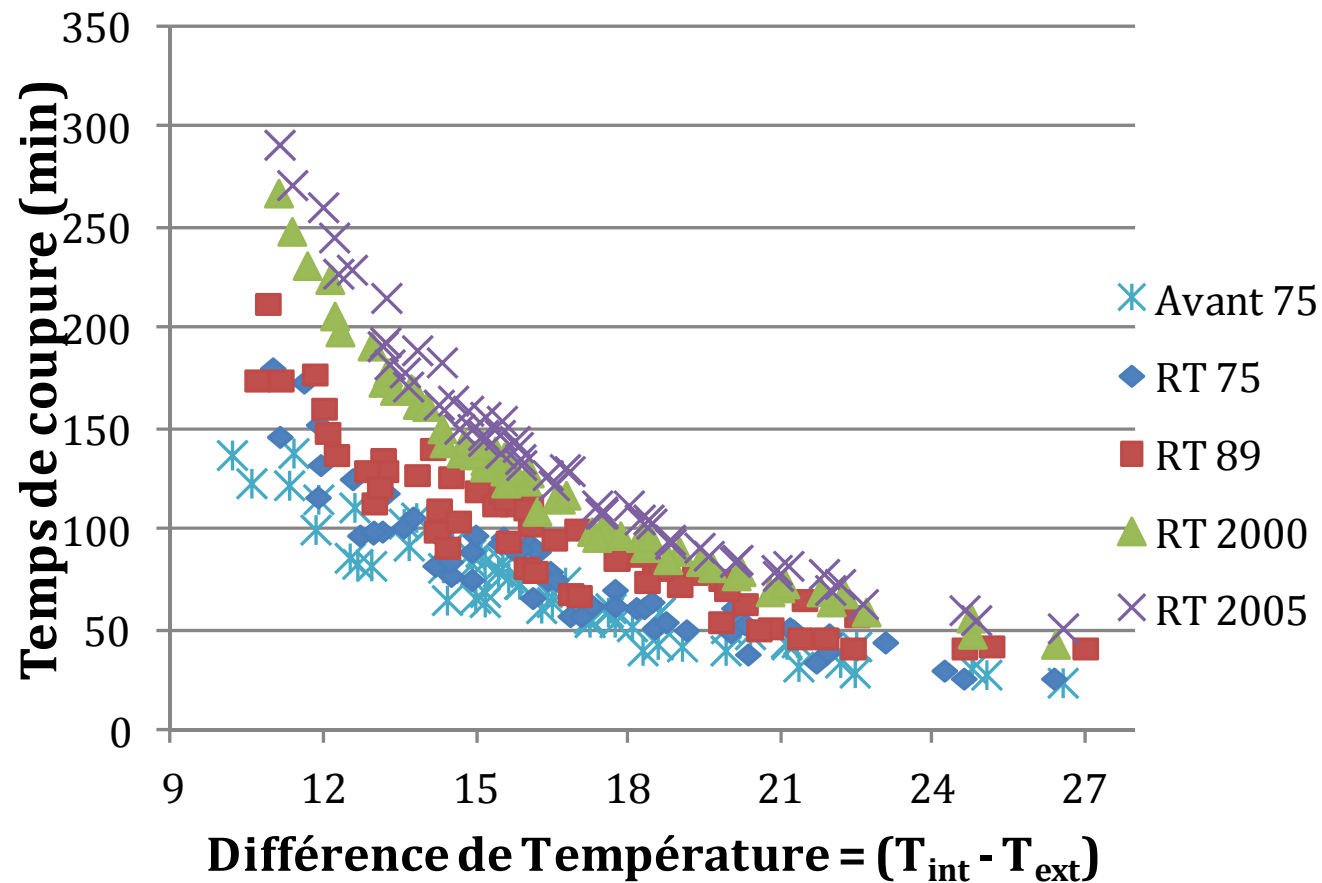
Combien de temps pour devenir inconfortable ?





## 4. Quantification du potentiel

Combien de temps pour devenir inconfortable ?



Appartement

## 4. Quantification du potentiel

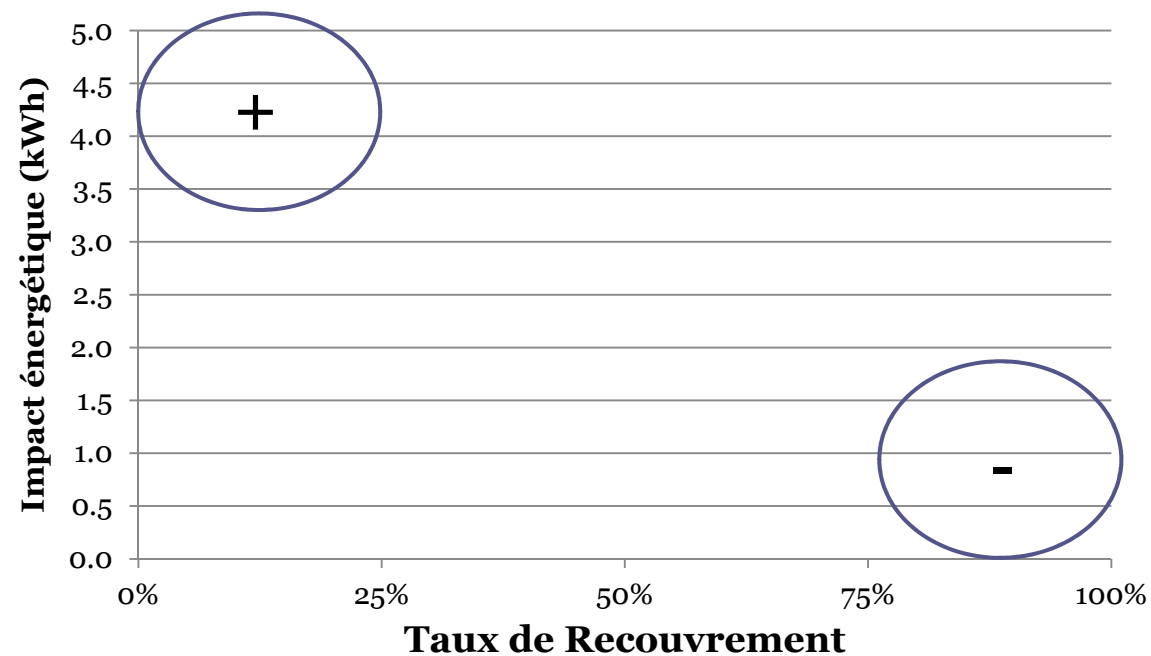
Quelle est la meilleure stratégie de contrôle ?

Les pointes critiques occurrent pendant les vagues de froid

- Température extérieure  $< 3^{\circ}\text{C}$
- Analyse d'une période constructive – RT 1989

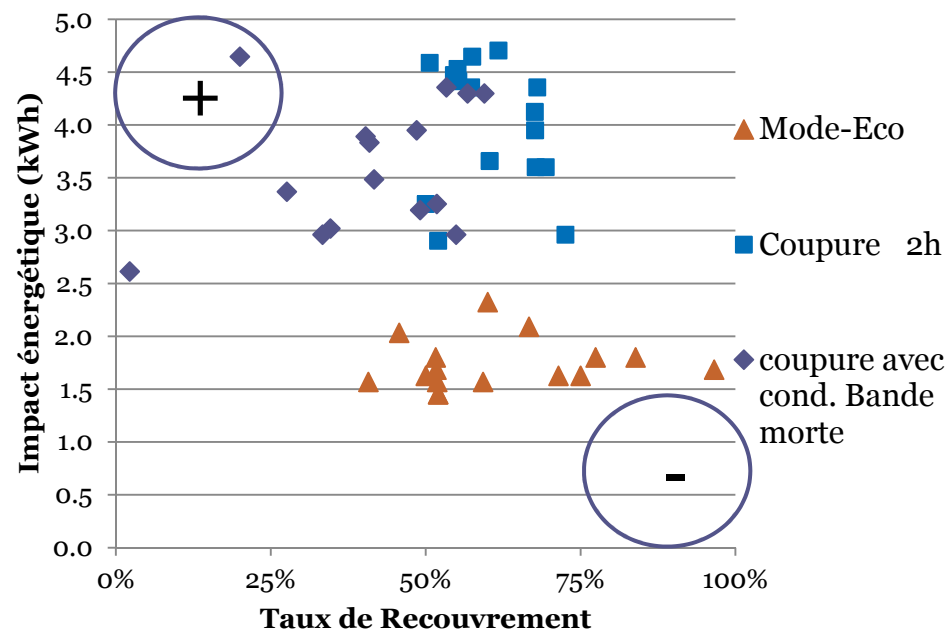
## 4. Quantification du potentiel

### Impact énergétique vs Recouvrement

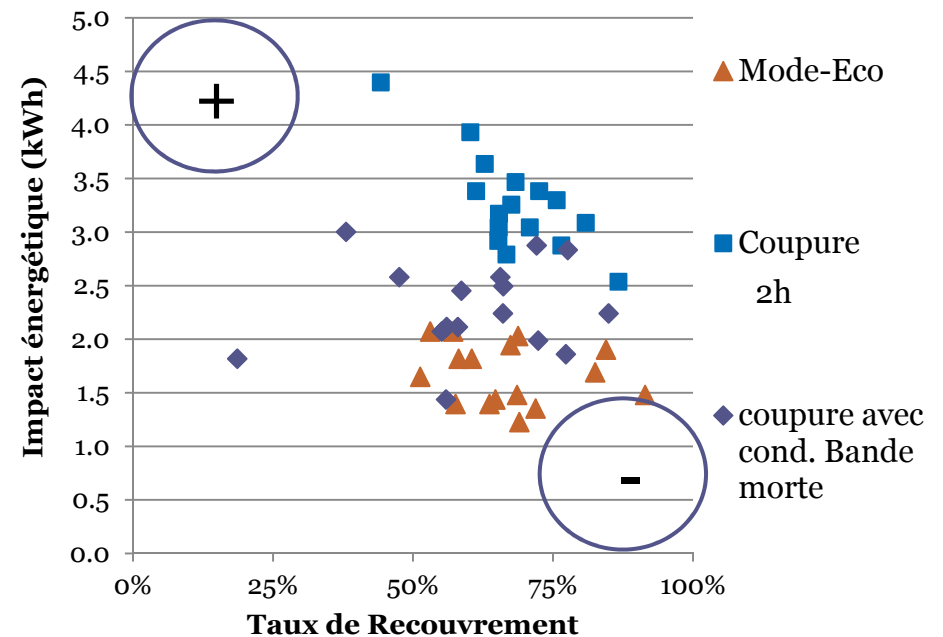


## 4. Quantification du potentiel

## Impact énergétique vs Recouvrement – RT 1989



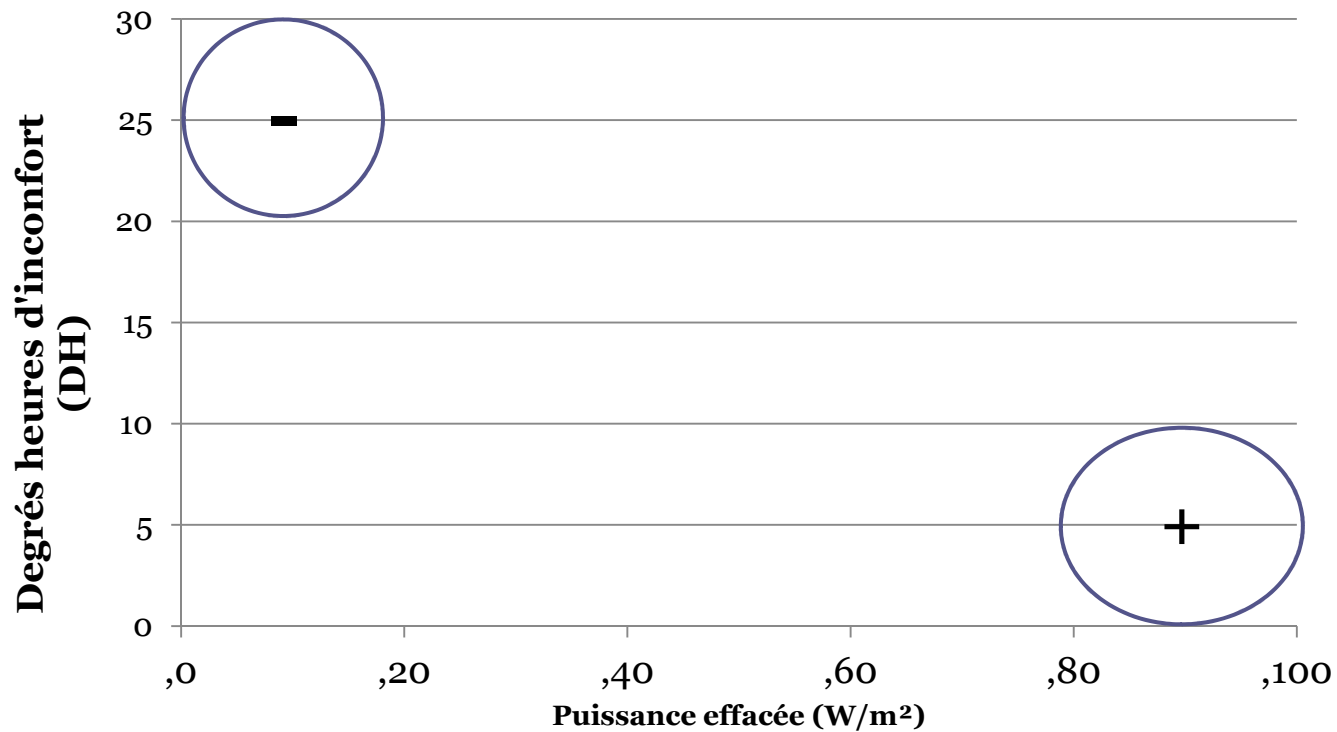
# Maison individuelle



# Appartement

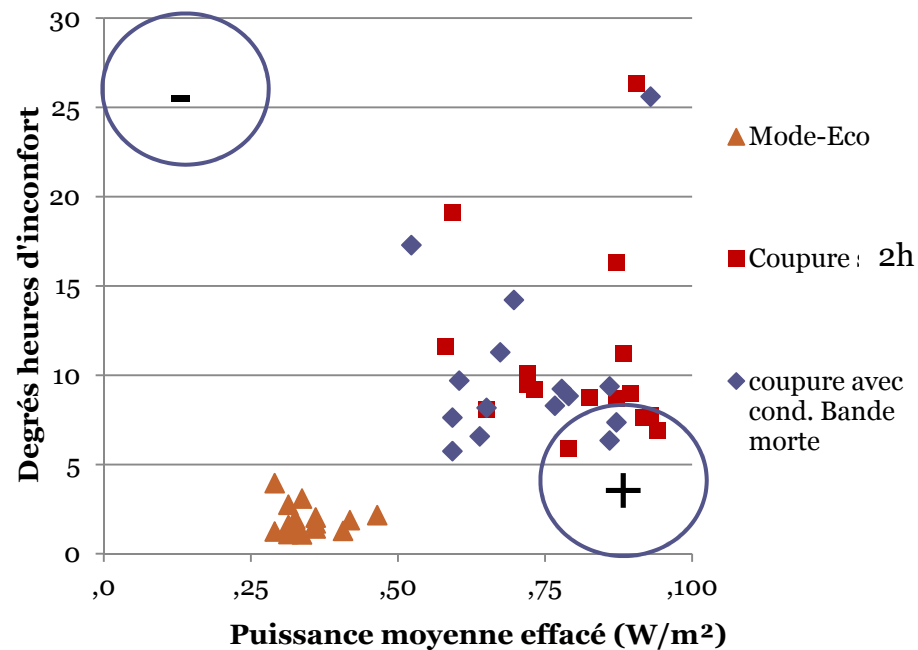
## 4. Quantification du potentiel

### Inconfort vs Puissance effacée

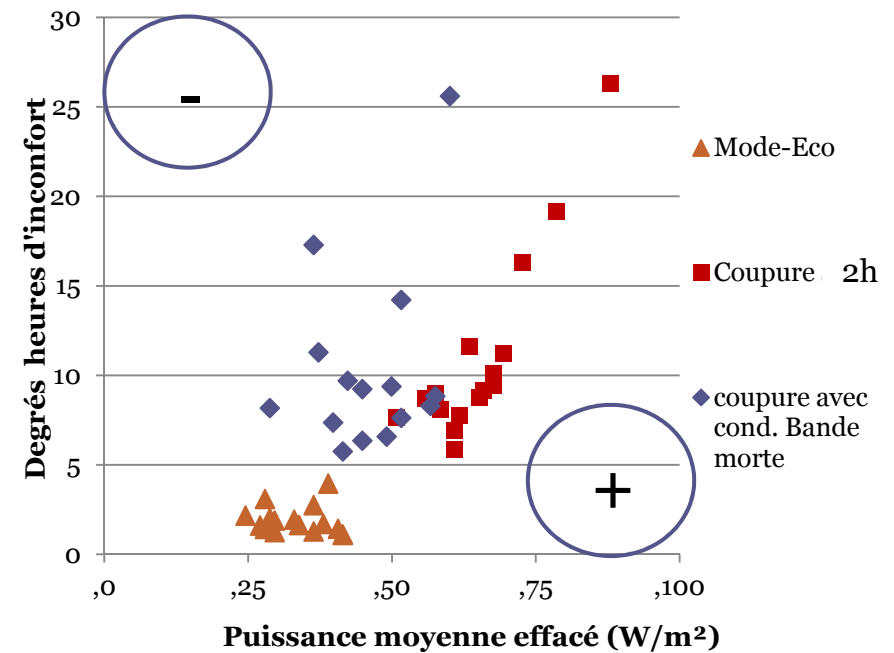


## 4. Quantification du potentiel

### Inconfort vs Puissance effacée – RT 1989



Maison individuelle



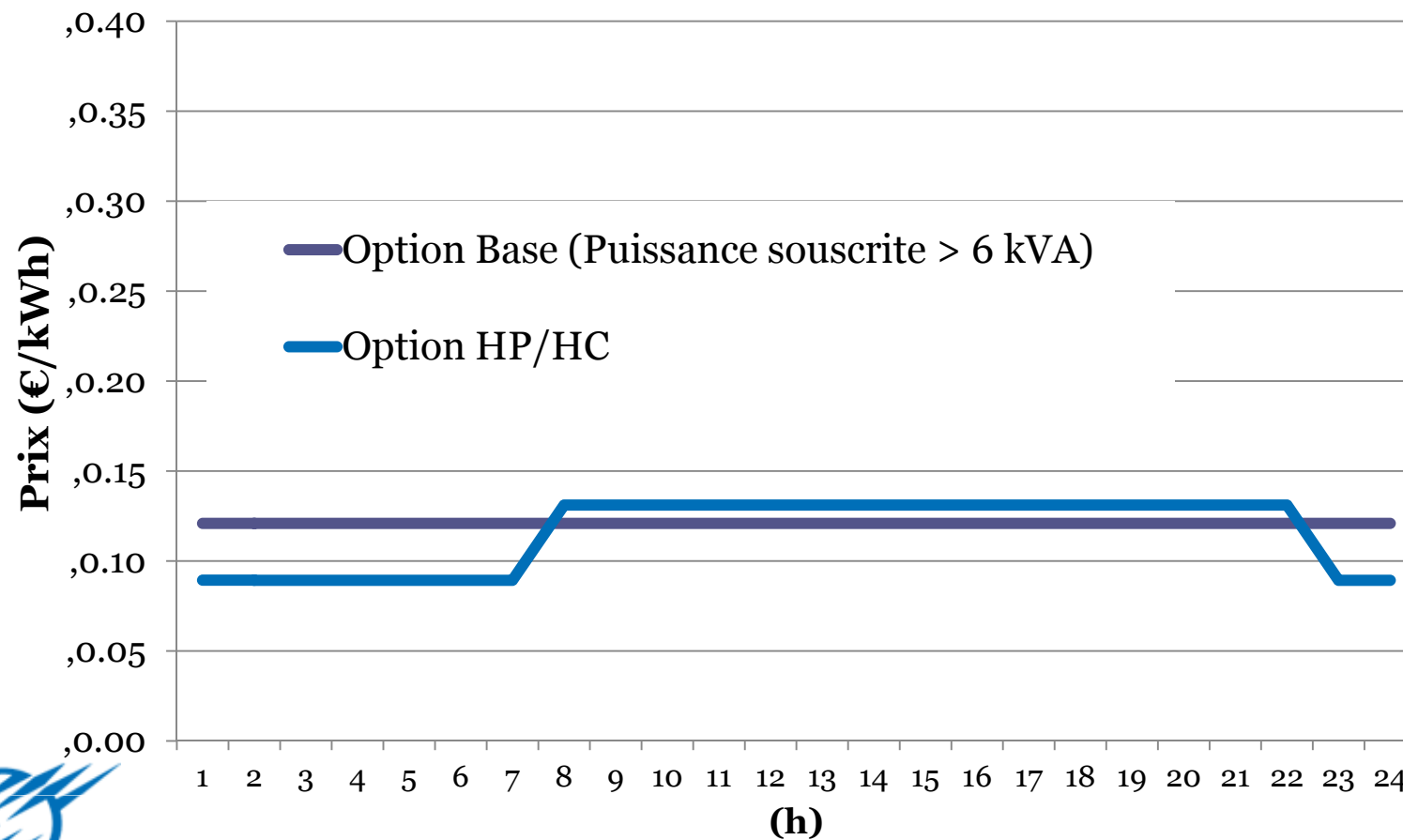
Appartement

## 4. Quantification du potentiel

### Bénéfices monétaires - Consommateur

## 4. Quantification du potentiel

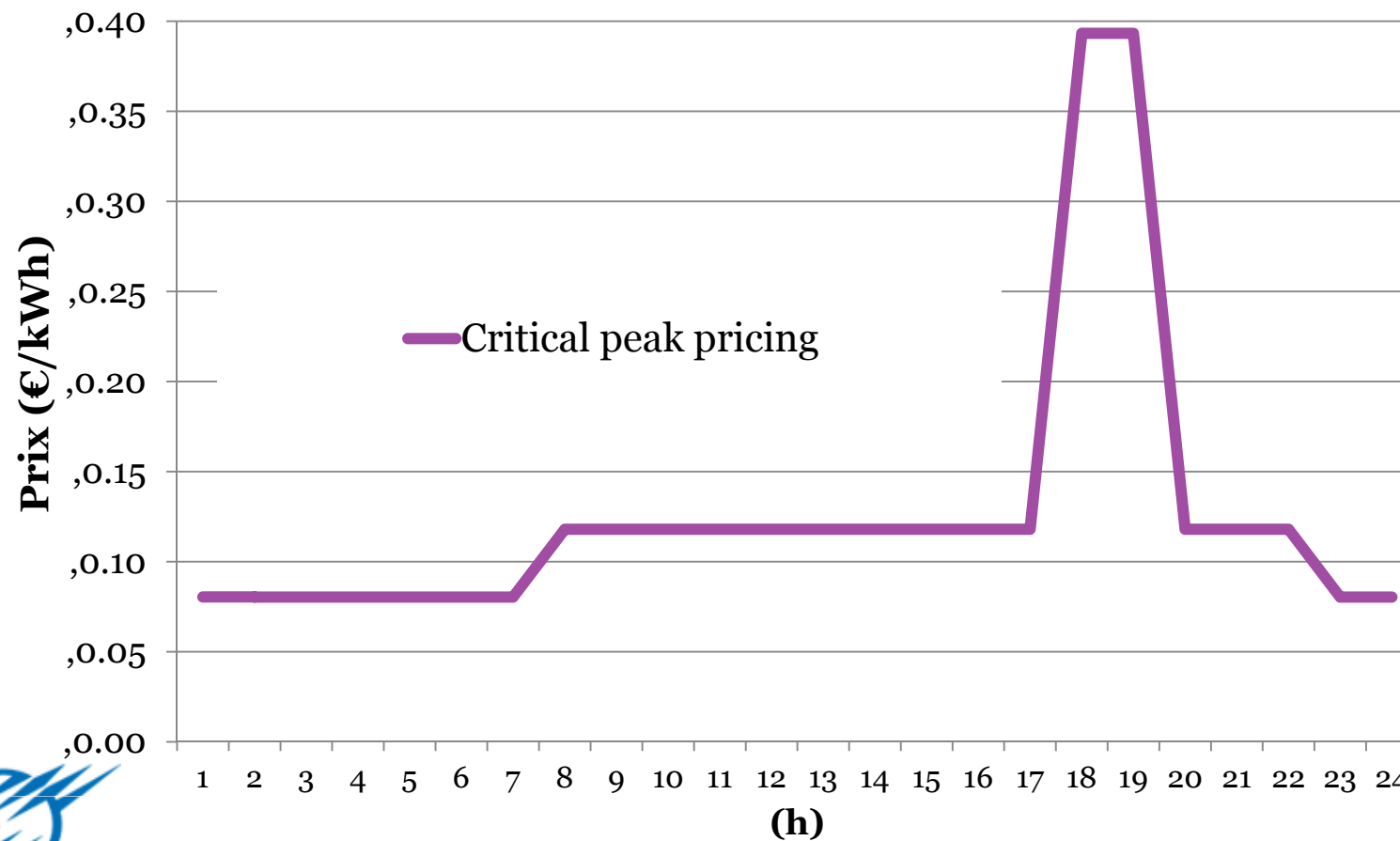
### Tarifications utilisées





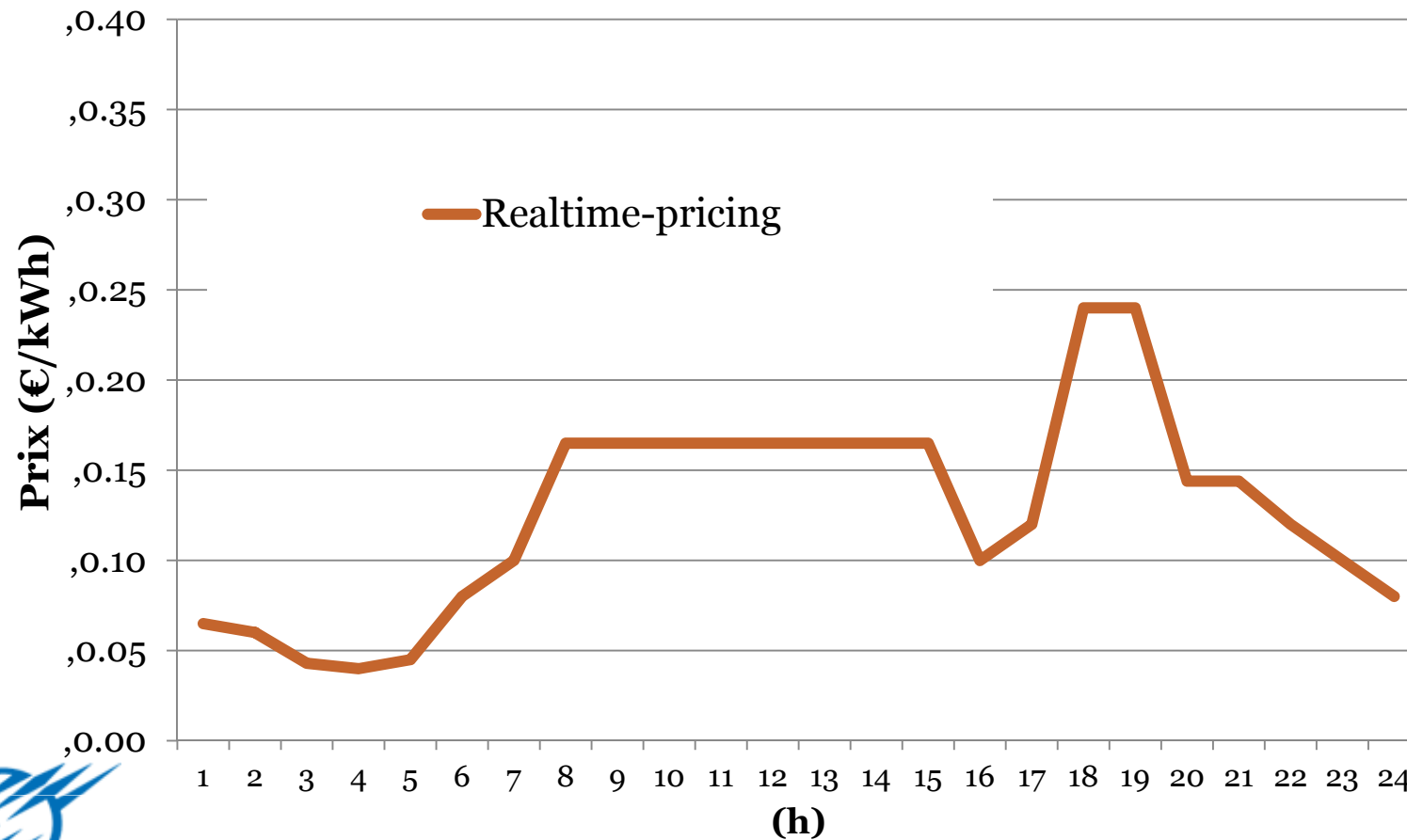
## 4. Quantification du potentiel

### Tarifications utilisées



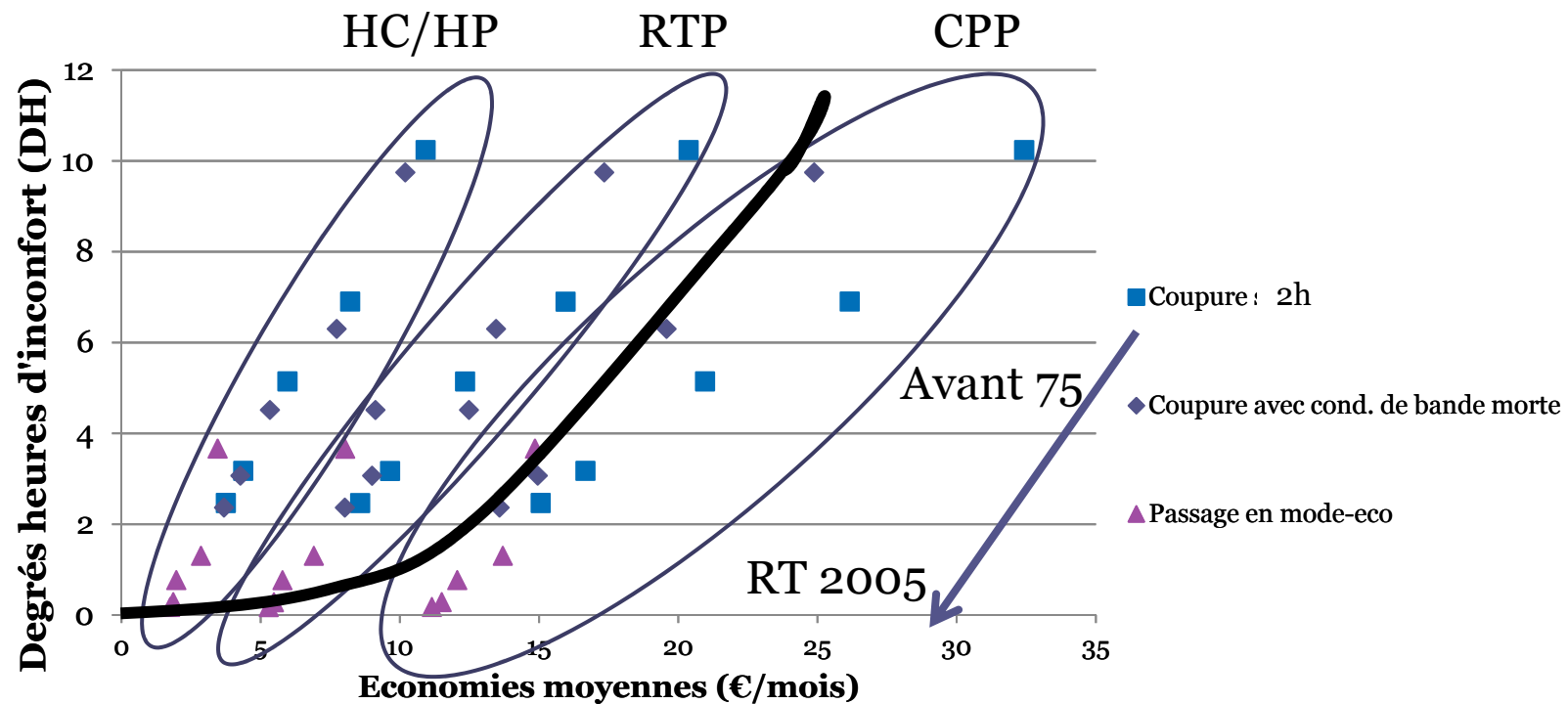
## 4. Quantification du potentiel

### Tarifications utilisées



## 4. Quantification du potentiel

### Bénéfices monétaires vs inconfort

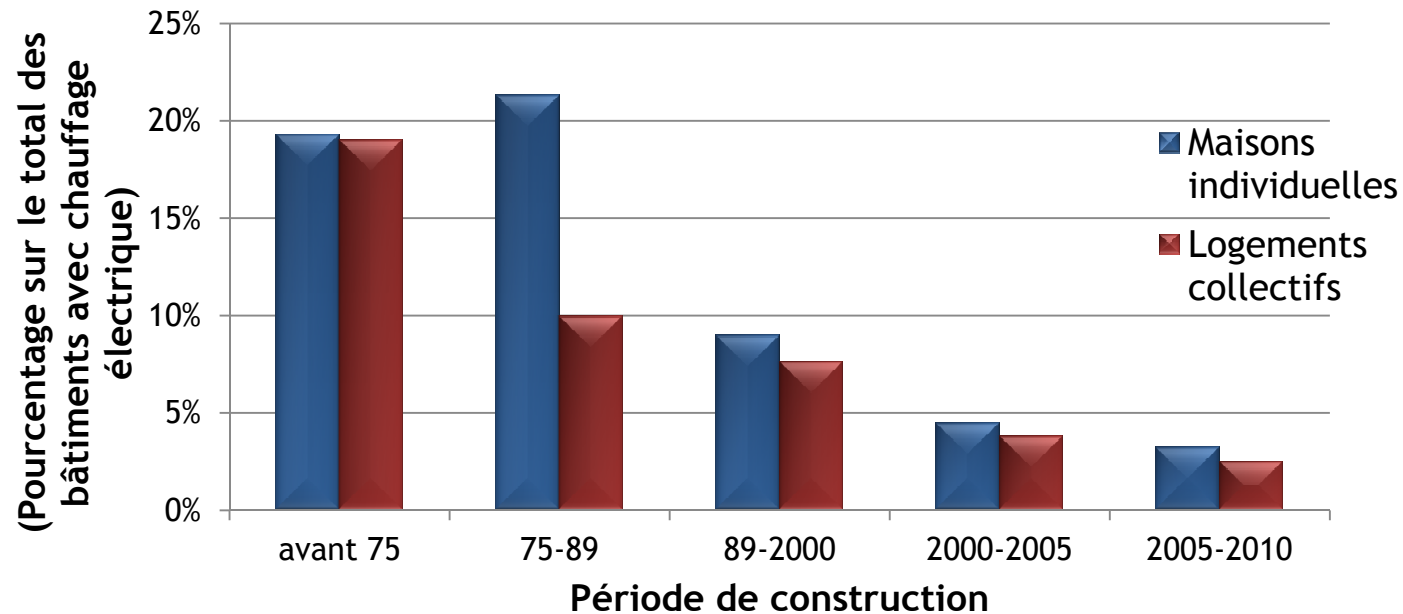


## 4. Quantification du potentiel

Analyse d'un groupe de bâtiments

## 4. Quantification du potentiel

### Données du parc simulé :



#### Paramètres des bâtiments

- Meubles ( $C_{air}$ ) – variation de +/- 25%
- Orientation (N - E - S – W)

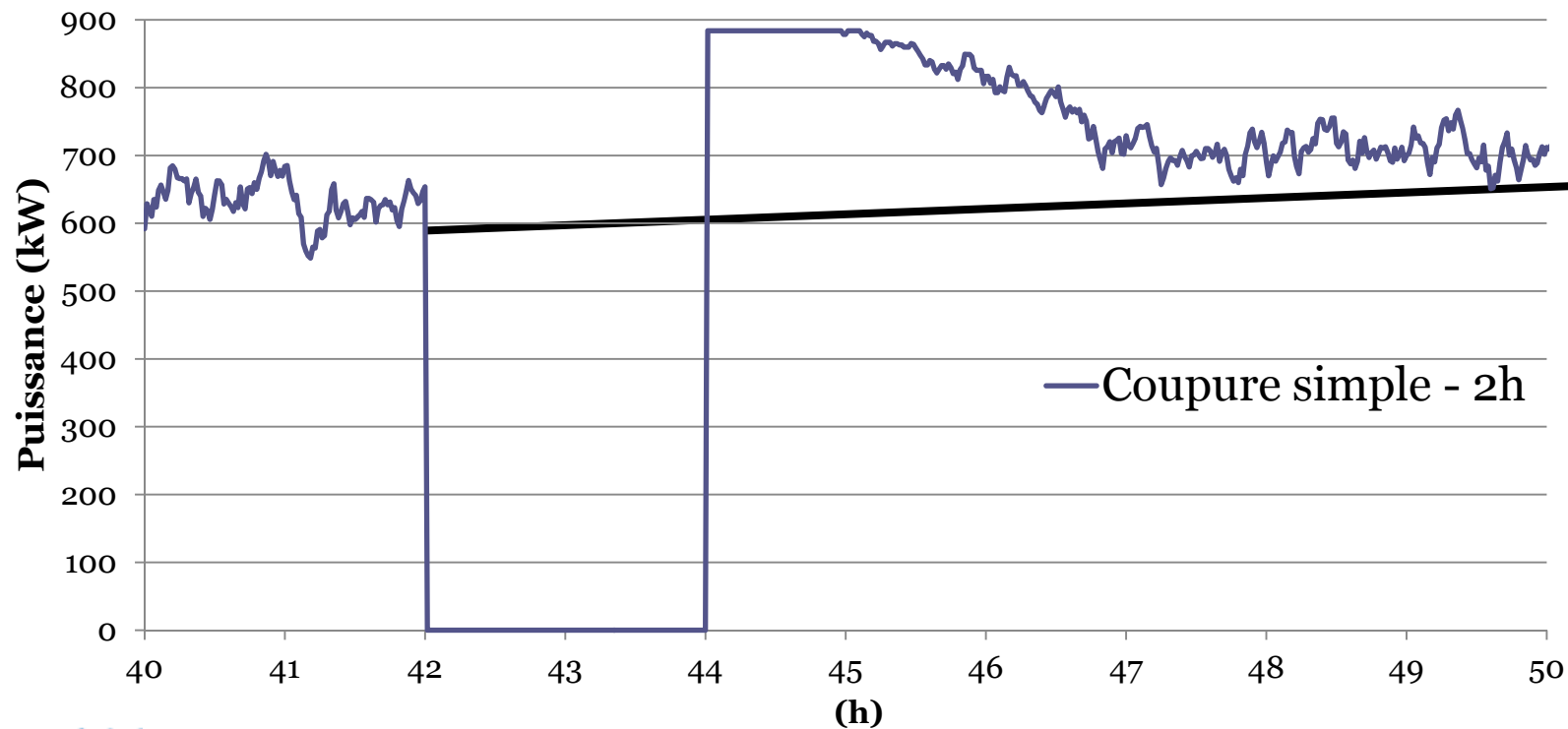
#### Randomisés +/- 5 %

- Épaisseur des murs internes
- Débit de ventilation
- Taille fenêtres
- Gains internes

Thèse - David DA SILVA

## 4. Quantification du potentiel

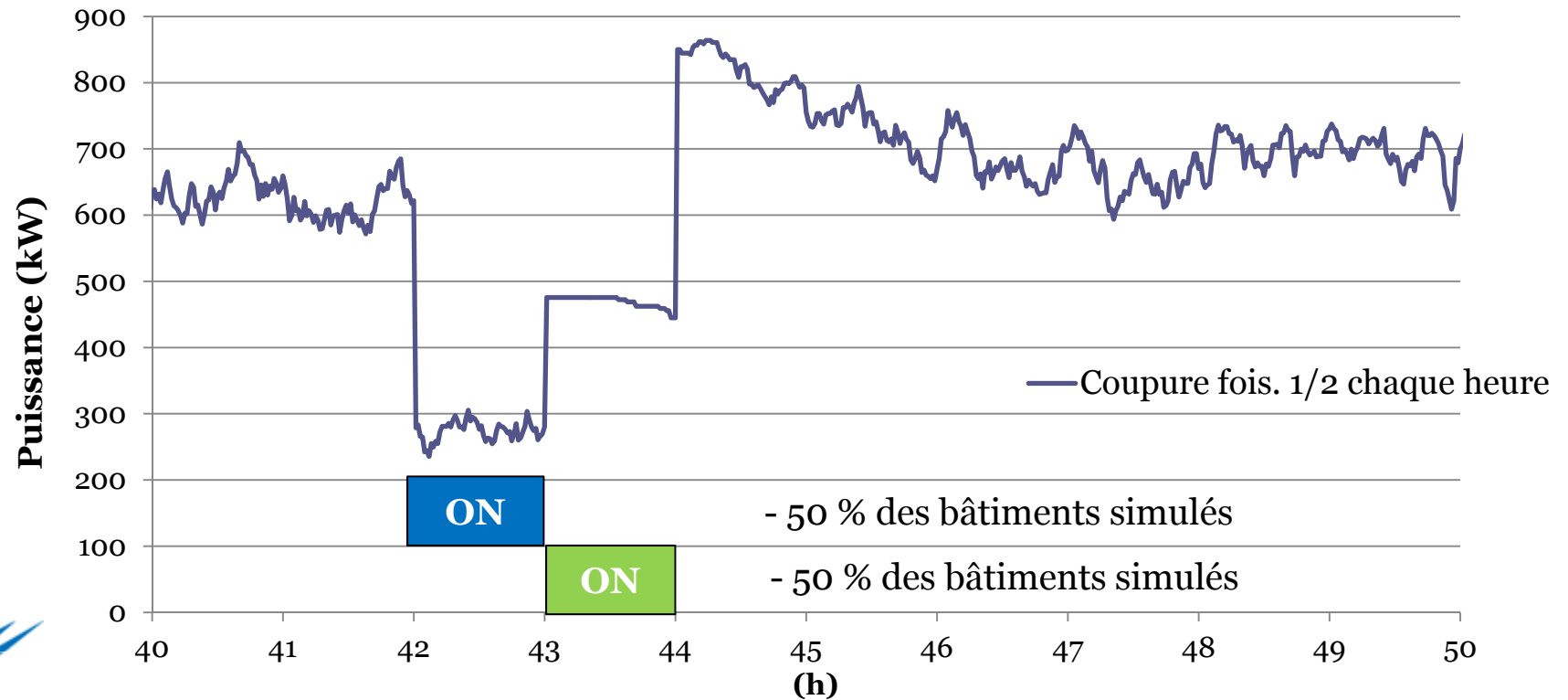
### Coupure simple – groupe de bâtiments



## 4. Quantification du potentiel

### Foisonnement des coupures

1 – Coupure foisonnée 1/2 chaque heure

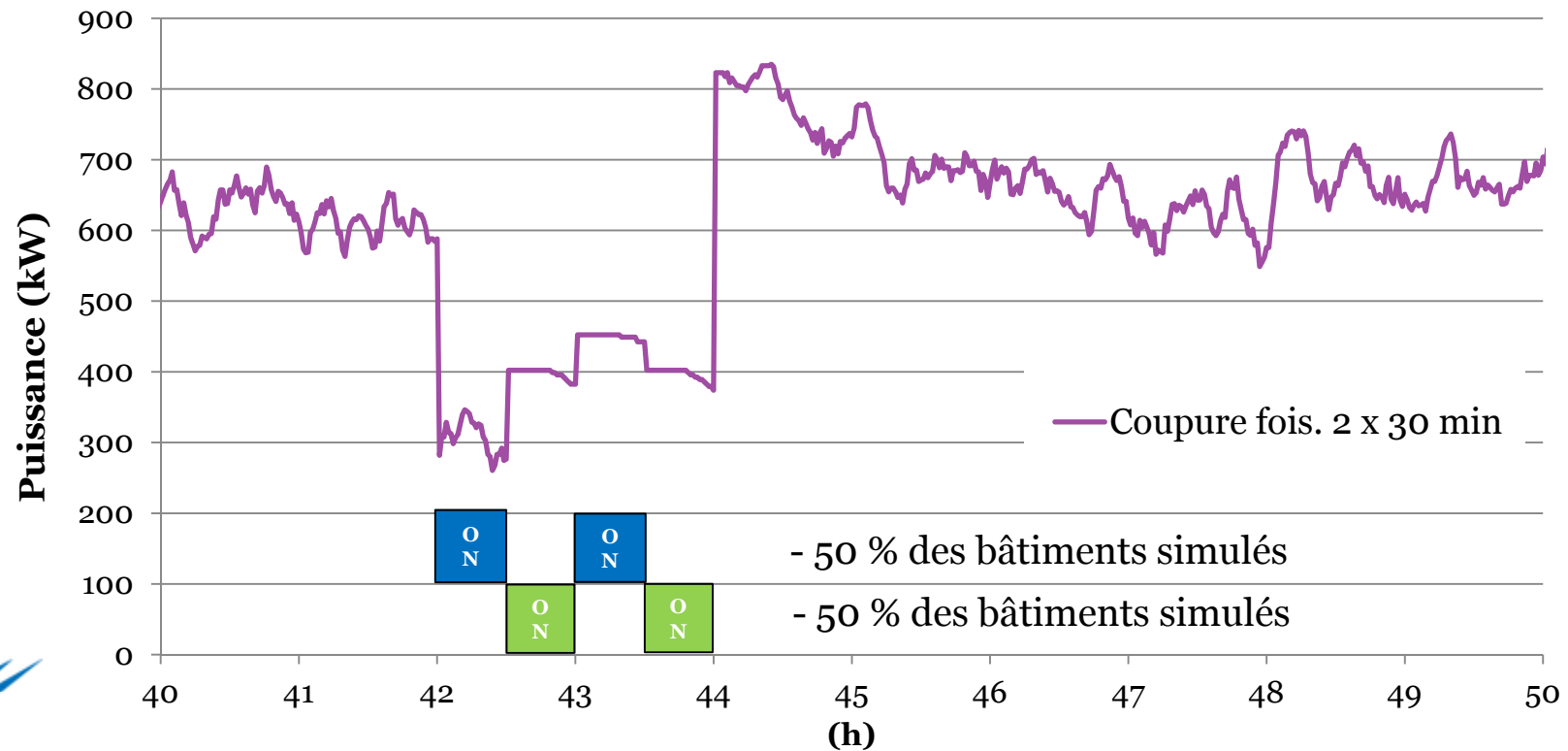


## 4. Quantification du potentiel

### Foisonnement des coupures

1 – Coupure foisonnée  $\frac{1}{2}$  chaque heure

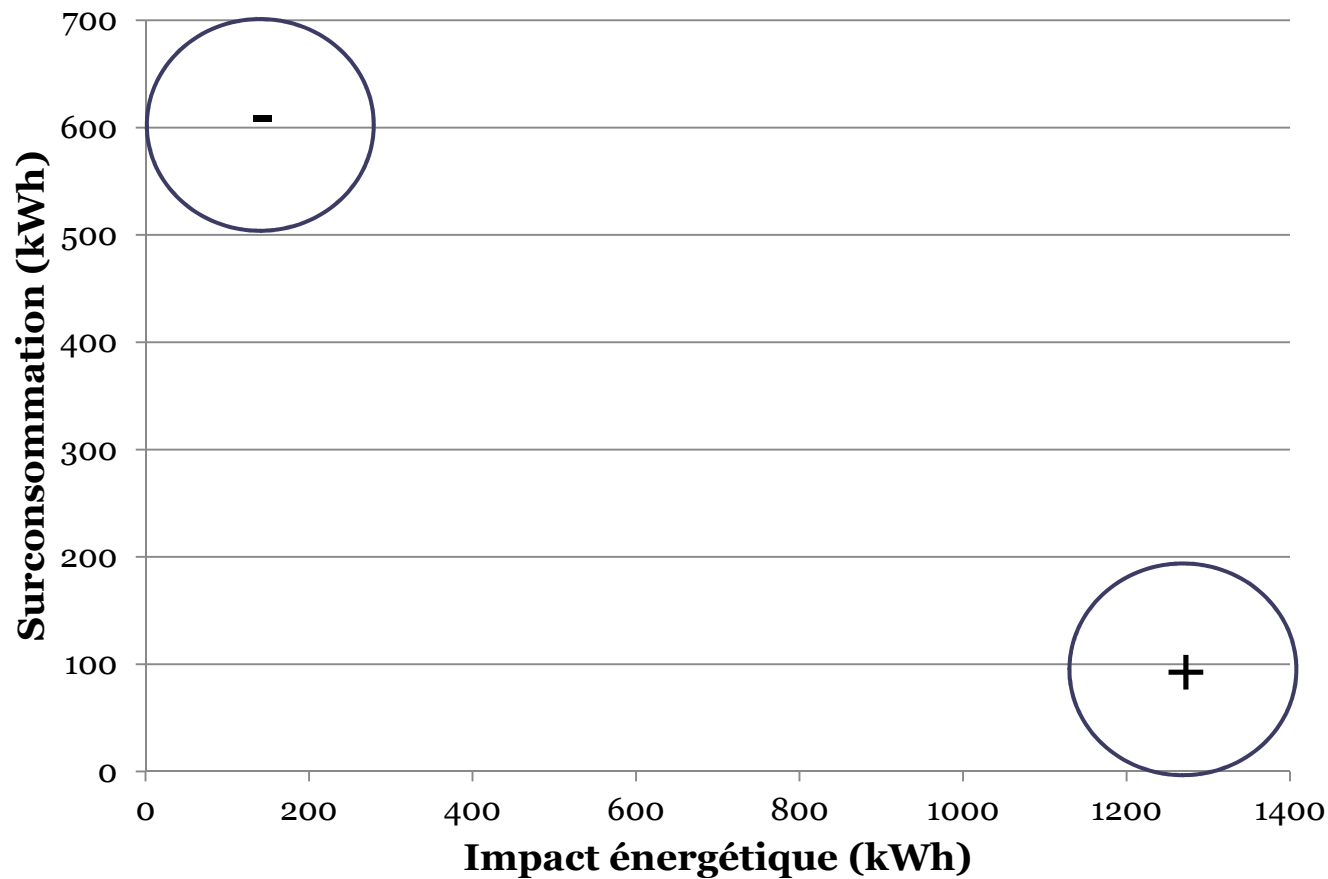
2 – Coupure foisonnée 2 x 30 minutes





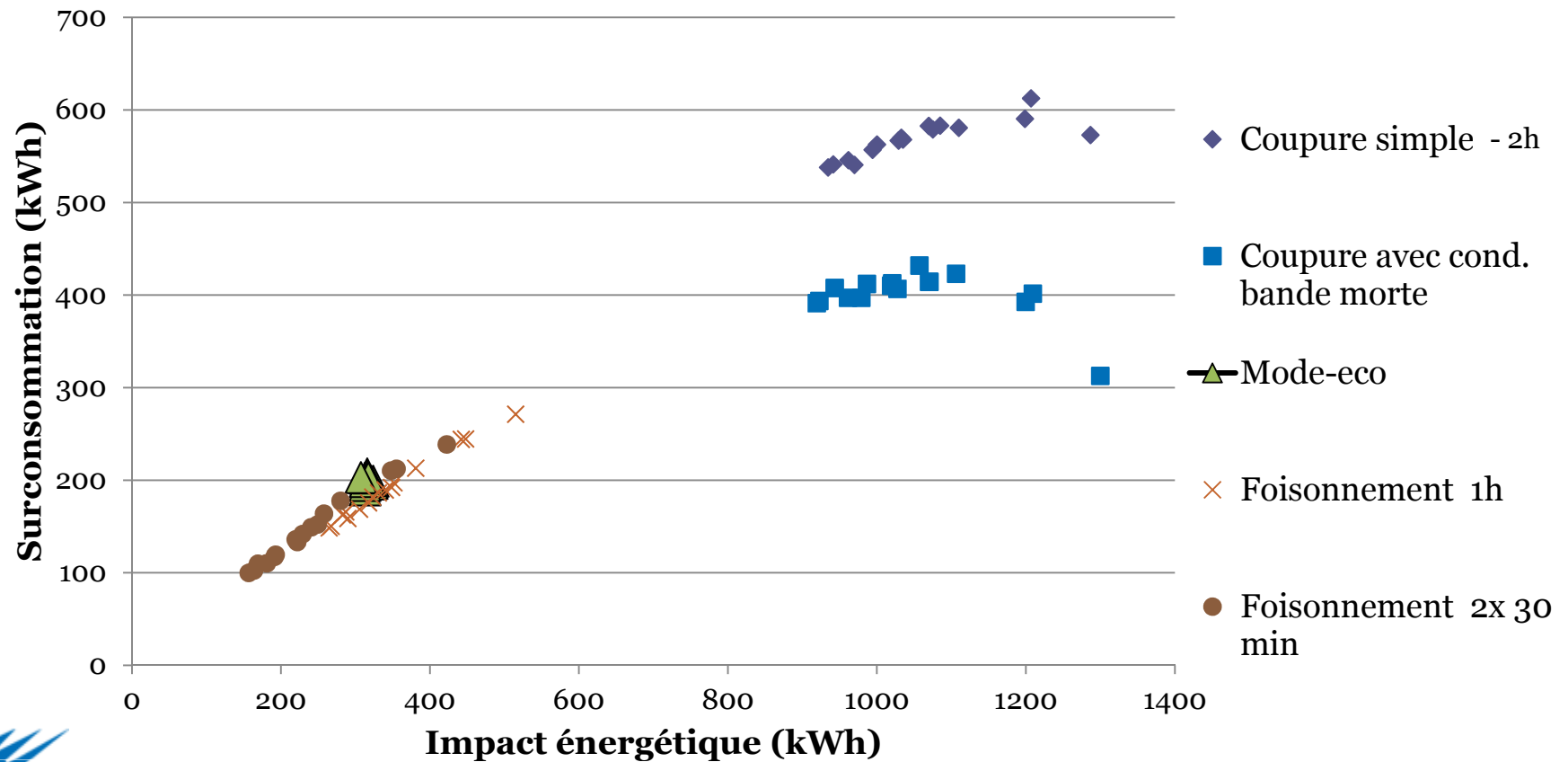
## 4. Quantification du potentiel

### Analyse énergétique – groupe de bâtiments



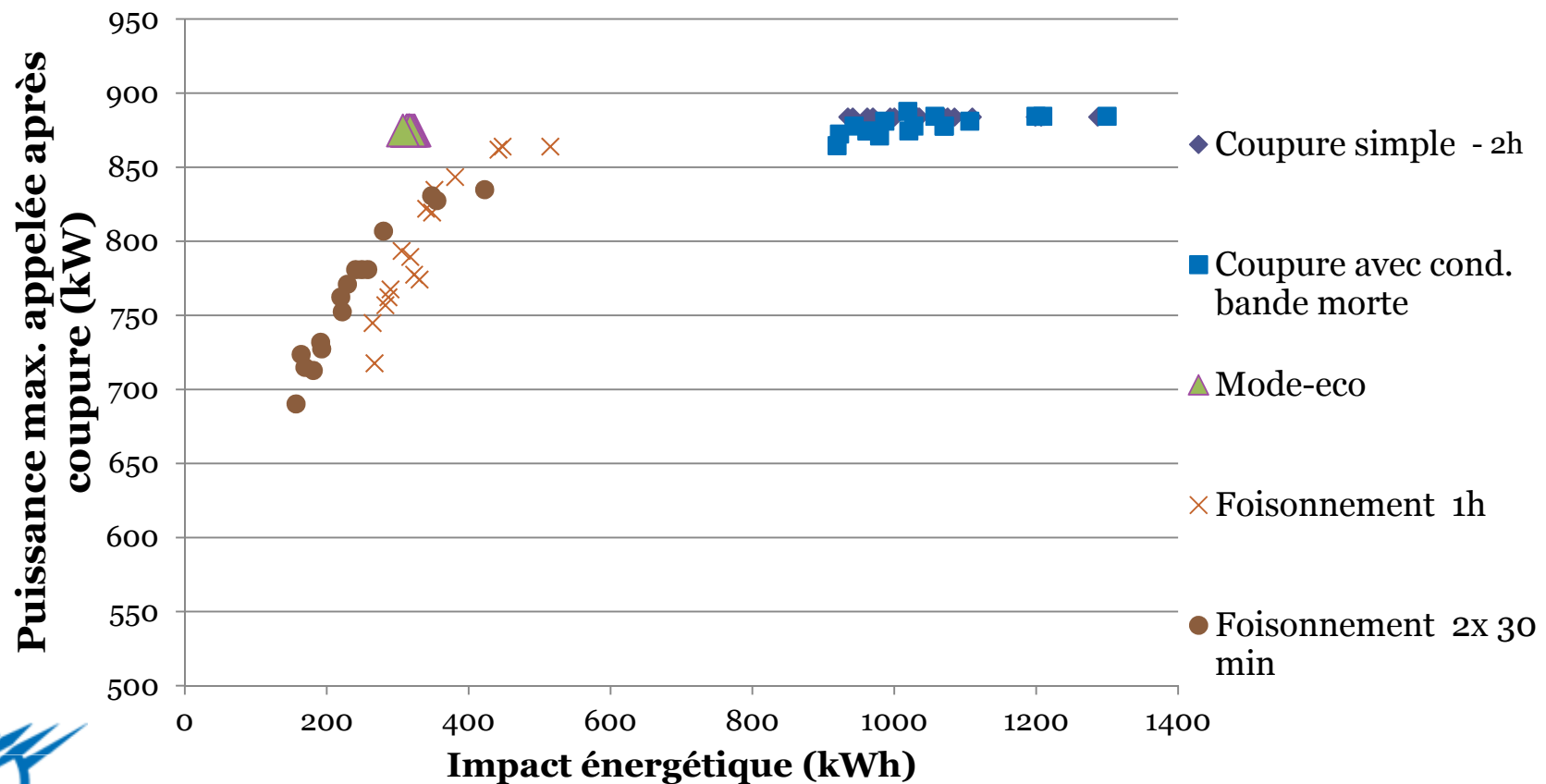
## 4. Quantification du potentiel

### Analyse énergétique – groupe de bâtiments



## 4. Quantification du potentiel

### Puissance appelée après coupure - groupe de bâtiments



# Conclusion

- Potentiel des différents usages électriques résidentiels
- Méthodologie pour repérer des stratégies de contrôle
- Étude approfondie du chauffage électrique :
  - Modèle thermique du bâtiment – Mono-zone adapté à nos besoins
  - Procédure de simulation
  - Indicateurs pour évaluer les différentes stratégies
- Quantification de la valeur de différentes stratégies de contrôle
  - Impact individuel des stratégies de contrôle du chauffage électrique
  - Analyse des gains monétaires – consommateur
  - Analyse des impacts des différentes stratégies sur un groupe de bâtiments

# Perspectives

- Calibration du modèle - Données réelles
- Etudier la combinaison des différentes stratégies
- Optimisations des stratégies pour gains monétaires maximaux
  - Profils d'occupation et de consigne - Connus
- Etudes d'acceptabilité des coupures (confort en régime dynamique)
- Etudes coût-bénéfice
  - Valeur de l'effacement sur le marché
  - Coût d'installation et exploitation des contrôleurs

# Questions

Thèse - David DA SILVA

David DA SILVA  
[Davidnmdasilva@gmail.com](mailto:Davidnmdasilva@gmail.com)

