

## Contexte

Le Maroc importe plus 94 % de ses besoins en énergie

Le bâtiment est le premier secteur consommateur de l'énergie au Maroc (36%)

Construction d'environ 2.800.000 nouveaux bâtiments d'ici 2030 au Maroc

La nécessité d'améliorer les performances énergétiques du bâtiment au Maroc

## Objectifs

- ✓ Réduire les besoins de chauffage et de climatisation des maisons individuelles au Maroc par l'amélioration de l'enveloppe,
- ✓ Développer une méthodologie générale afin de proposer un modèle simple et rapide pour l'optimisation de l'enveloppe,
- ✓ Chercher le compromis entre les besoins de chauffage et de climatisation

## Méthodologie

### Paramètres d'entrée à variations continues:

| Définition                                                                                   | Symbole     | Niveau bas         | Niveau haut | Unité  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|-------------|--------|
| Coefficient de transmission des murs extérieurs                                              | $U_m$       | 0,2                | 1           | W/m².K |
| Coefficient d'absorption du rayonnement solaire des surfaces extérieures des murs extérieurs | $\alpha_m$  | 0,2                | 0,8         | ---    |
| Coefficient de transmission de la toiture                                                    | $U_t$       | 0,2                | 1           | W/m².K |
| Coefficient d'absorption du rayonnement solaire de la surface extérieure de la toiture       | $\alpha_t$  | 0,2                | 0,8         | ---    |
| Coefficient de transmission du plancher                                                      | $U_p$       | 0.59               | 2.32        | W/m².K |
| Coefficient de transmission linéique des ponts thermiques                                    | $\psi_{pt}$ | 0.01               | 1           | W/m.K  |
| Taux de renouvellement d'air                                                                 | ACH         | 0                  | 2           | v/h    |
| Facteur d'ombrage sur les fenêtres orientées Sud                                             | $FO_s$      | 0                  | 1           | ---    |
| Facteur d'ombrage sur les fenêtres orientées Est                                             | $FO_e$      | 0                  | 1           | ---    |
| Facteur d'ombrage sur les fenêtres orientées Ouest                                           | $FO_o$      | 0                  | 1           | ---    |
| Vitrage                                                                                      | V           | V1, V2, V3, V4, V5 |             | ---    |

### Paramètre d'entrée à variation discrète:

| Vitrage                                                           | Epaisseur (mm)        | U-value (W/m².K) | g-value | Transmission solaire | Réflexion solaire | Transmission visuelle |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|---------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| Simple vitrage (V1)                                               | 2.5                   | 5.74             | 0.87    | 0.85                 | 0.075             | 0.901                 |
| Double vitrage (V2)                                               | 2.5/12.7/2.5          | 2.95             | 0.777   | 0.727                | 0.129             | 0.817                 |
| Triple vitrage (V3)                                               | 2.5/12.7/2.5/12.7/2.5 | 2                | 0.7     | 0.624                | 0.168             | 0.744                 |
| Double vitrage + 1 couches faible émissivité (V4)                 | 3/12.7/2.5            | 1.76             | 0.597   | 0.544                | 0.22              | 0.769                 |
| Double vitrage avec de l'argon + 1 couches faible émissivité (V5) | 3/12.7/2.5            | 1.43             | 0.596   | 0.544                | 0.22              | 0.769                 |

### La régression polynomiale - Prédiction des besoins de chauffage et de climatisation

Variation Linéaire      Interaction entre les paramètres      Variation quadratique

$$\hat{Y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2$$

$\hat{Y}$ : la réponse prédite par le modèle polynomial (besoins de chauffage ou de climatisation),

$x_i$  et  $x_j$ : les paramètres d'entrée,

$n$ : le nombre des paramètres,

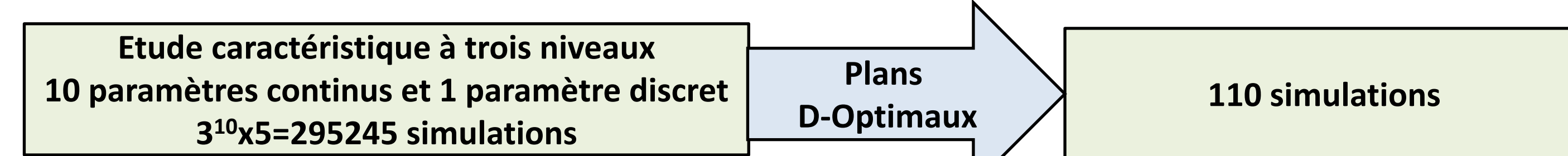
$a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$ : les coefficients du modèle déterminés par la méthode des moindres carrés:

$$[A] = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T [Y]$$

$[Y]$ : Vecteur des réponses calculés par TRNSYS

$[X]$ : Matrice de calcul

### Les plans d'expériences - Matrice de calcul:



### Algorithme d'optimisation - Fonction de désirabilité

$$d_i^{\min} = \begin{cases} 0 & \text{Si } Y_i > Y_{i,\max} \\ \left( \frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,\min} - Y_{i,\max}} \right)^{\eta} & \text{Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \\ 1 & \text{Si } Y_i < Y_{i,\min} \end{cases}$$

$Y_{i,\max}$  est la valeur au dessus de laquelle

la réponse ne convient pas ( $d_i = 0$ )

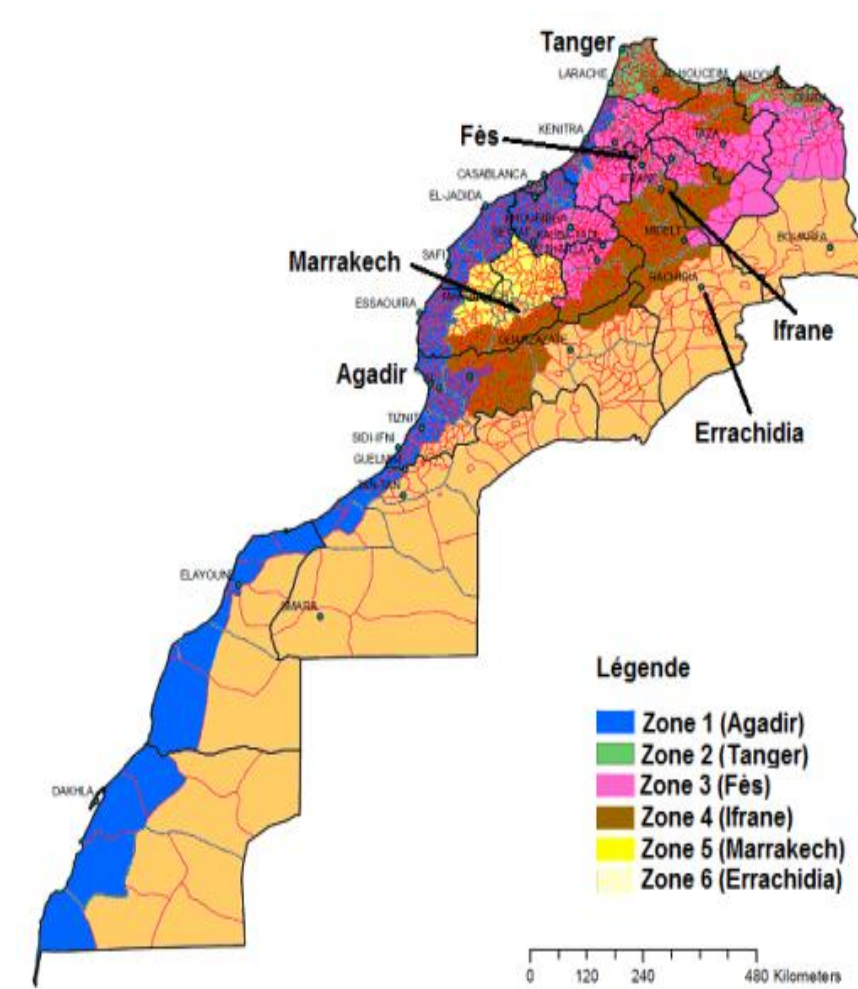
$Y_{i,\min}$  est la valeur cible en dessous de

laquelle la réponse est très satisfaisante ( $d_i = 1$ )

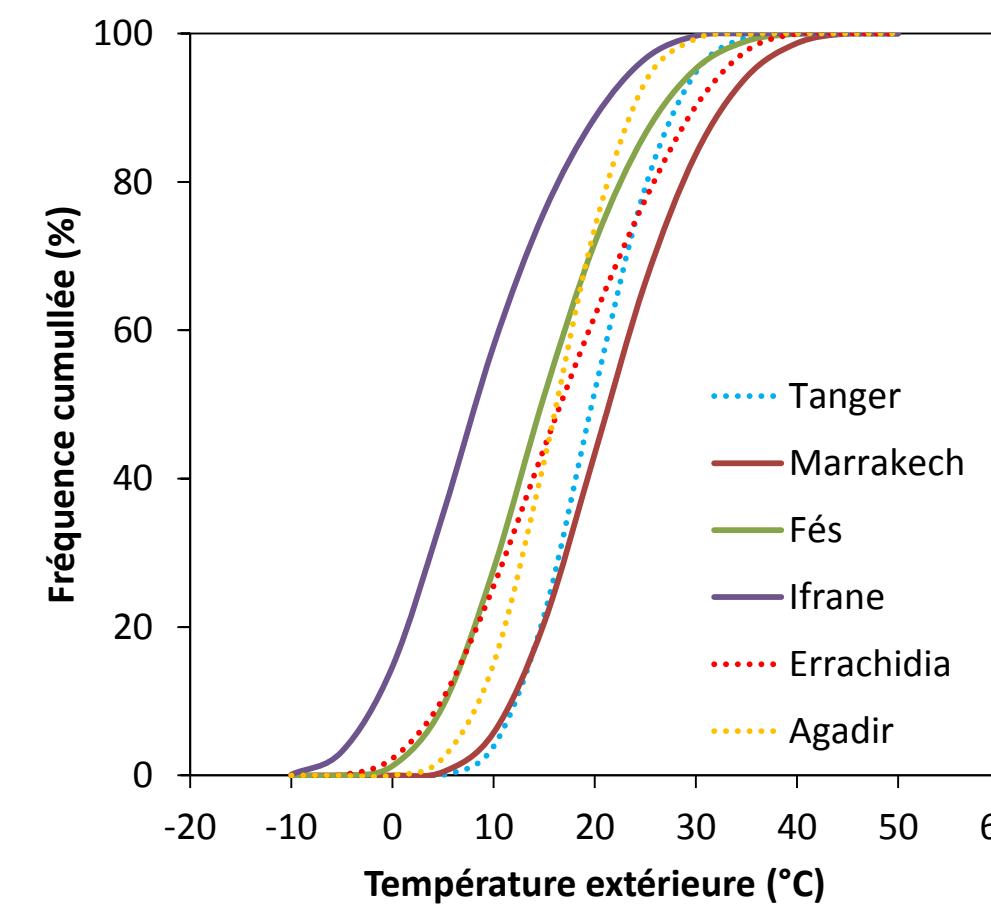
$$\text{Désirabilité globale: } D = (d_{\text{chauffage}} \times d_{\text{climatisation}})^{\frac{1}{2}}$$

Chercher la combinaison des paramètres dont D est maximale (Algorithme simplex)

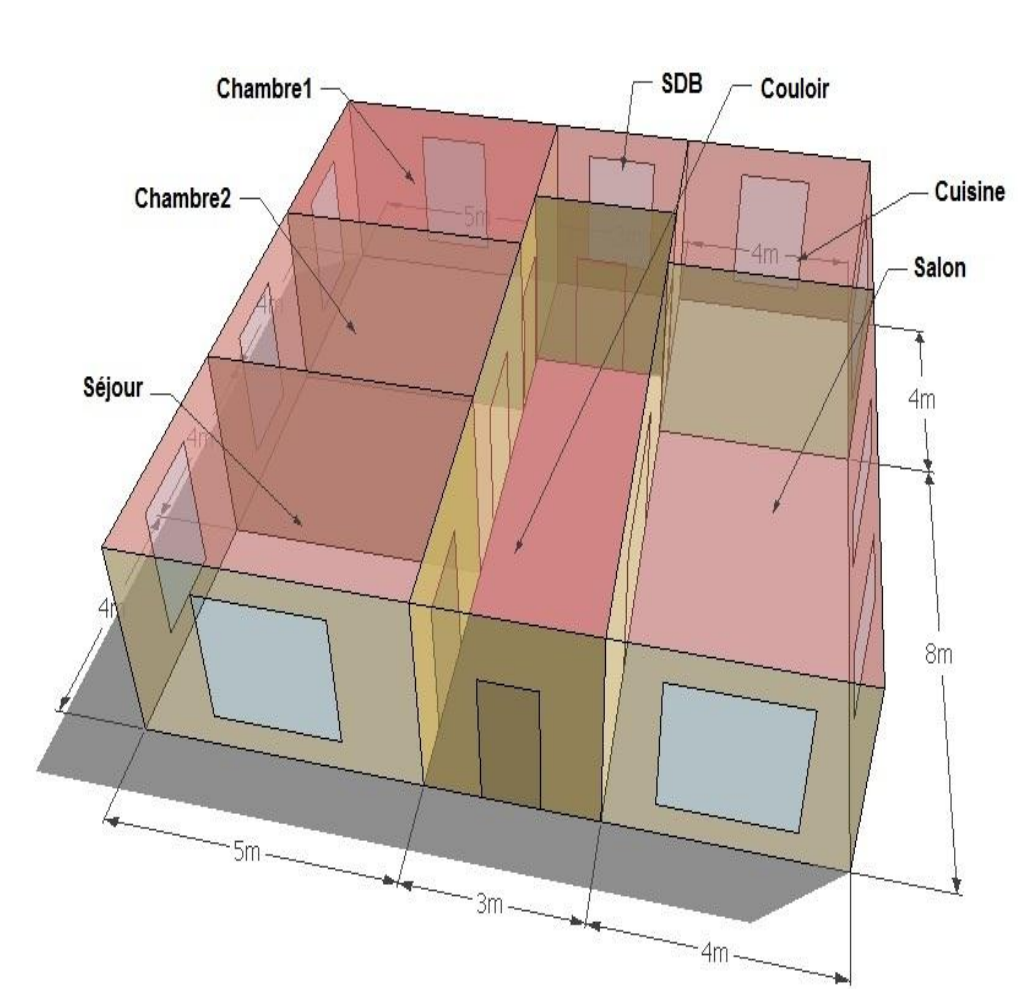
## Bâtiment étudié



Zonage climatique



La fréquence cumulée de la température extérieure



Vue 3D du bâtiment étudié

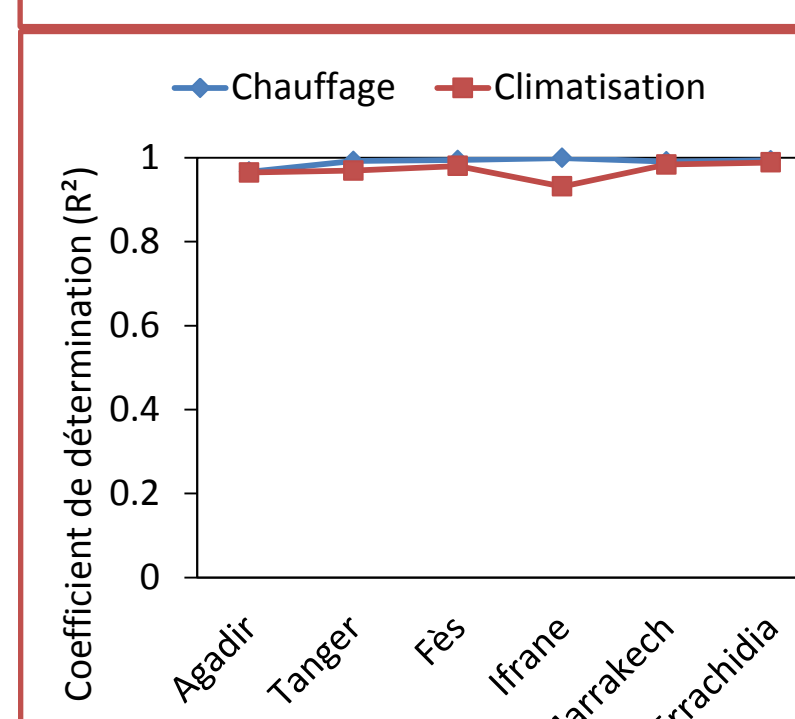
## Résultats

### Evaluation de la précision:

Pour l'évaluation de la précision du modèle polynomial, 100 simulations dynamiques supplémentaires avec TRNSYS ont été réalisées avec des combinaisons aléatoires des paramètres de l'enveloppe.

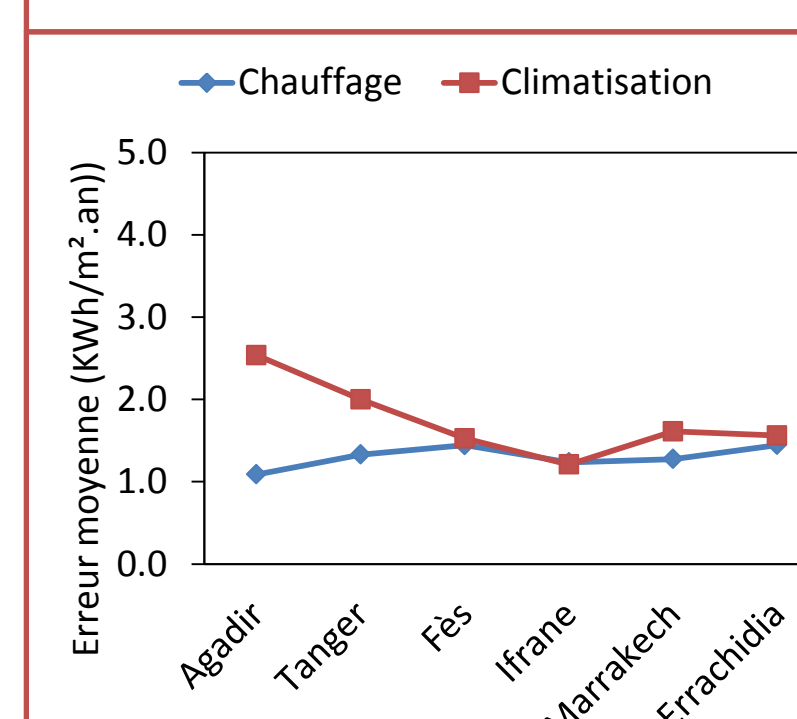
#### Coefficient de détermination

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}$$



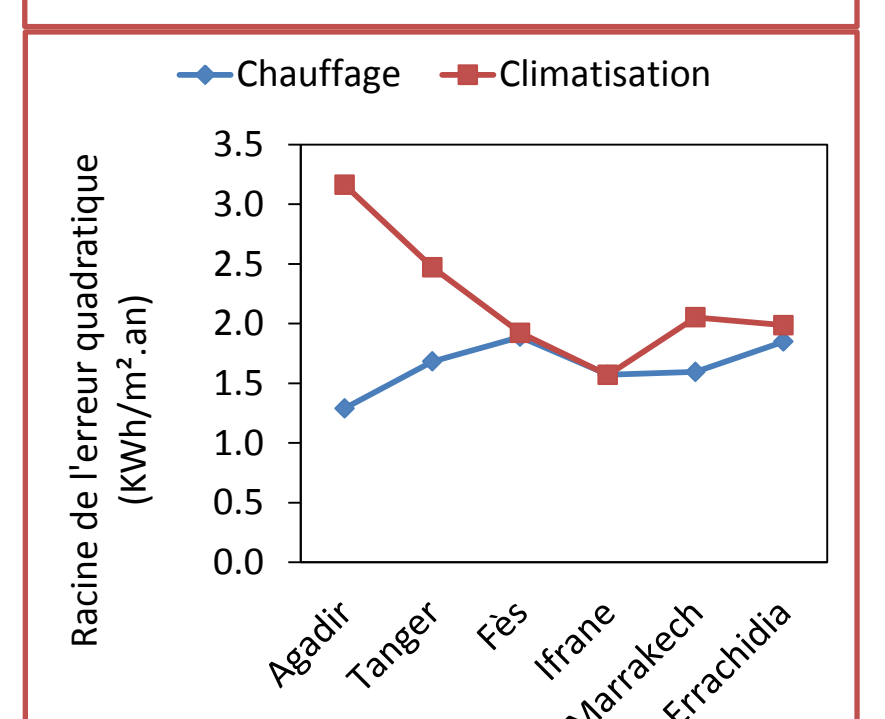
#### Erreur moyenne

$$E_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^m |Y_i - \hat{Y}_i|}{n}$$



#### Racine de l'erreur quadratique

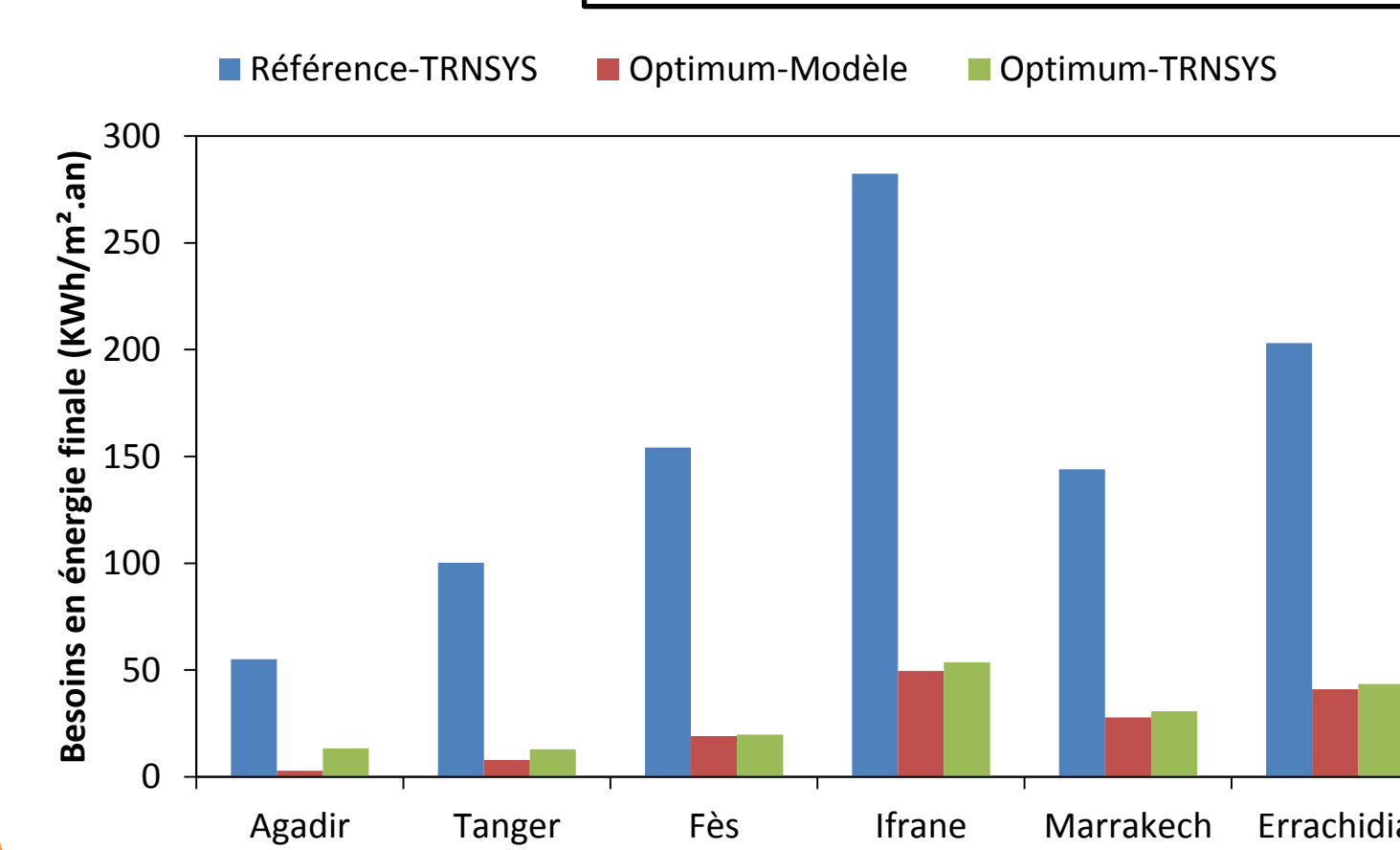
$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$$



### Optimisation de l'enveloppe:

|            | $U_m$ | $\alpha_m$ | $U_t$ | $\alpha_t$ | $U_p$ | $\psi_{pt}$ | ACH  | $FO_s$ | $FO_e$ | $FO_w$ | Vitrage |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|-------------|------|--------|--------|--------|---------|
| Reference  | 1     | 0.5        | 1     | 0.5        | 2.32  | 1           | 2    | 0      | 0      | 0      | V1      |
| Agadir     | 1     | 0.32       | 0.55  | 0.2        | 2.32  | 0.44        | 0.66 | 1      | 1      | 1      | V4      |
| Tanger     | 0.2   | 0.44       | 0.42  | 0.2        | 2.32  | 0.52        | 0.66 | 1      | 1      | 1      | V5      |
| Fès        | 0.2   | 0.39       | 0.26  | 0.2        | 2.32  | 0.21        | 0.66 | 1      | 1      | 1      | V5      |
| Ifrane     | 0.2   | 0.49       | 0.20  | 0.8        | 2.32  | 0.53        | 0.66 | 1      | 1      | 1      | V5      |
| Marrakech  | 0.2   | 0.37       | 0.38  | 0.2        | 2.32  | 0.37        | 0.66 | 1      | 1      | 1      | V5      |
| Errachidia | 0.2   | 0.33       | 0.20  | 0.2        | 2.32  | 0.01        | 0.66 | 1      | 1      | 1      | V5      |

### Les valeurs optimales des paramètres de l'enveloppe



Comparaison des besoins en énergie finale entre la configuration de référence et la configuration optimale

|            | Référence-TRNSYS (KWh/m².an) | Optimum-TRNSYS (KWh/m².an) | Pourcentage de réduction (%) |
|------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Agadir     | 55.07                        | 13.30                      | 75.85                        |
| Tanger     | 100.23                       | 12.94                      | 87.09                        |
| Fès        | 154.10                       | 19.77                      | 87.17                        |
| Ifrane     | 282.31                       | 53.65                      | 80.99                        |
| Marrakech  | 143.93                       | 30.66                      | 78.70                        |
| Errachidia | 203.03                       | 43.42                      | 78.61                        |

Pourcentage de réduction par rapport au cas de référence

## Conclusions

- ✓ La précision du modèle polynomial est satisfaisante,
- ✓ Ce modèle permet de réaliser une prédiction rapide des besoins de chauffage et de climatisation,
- ✓ La recherche de la combinaison optimale des paramètres de l'enveloppe est facile et rapide à réaliser,
- ✓ Cette méthodologie permet de trouver facilement le compromis entre les besoins de chauffage et de climatisation,
- ✓ L'optimisation de l'enveloppe permet de réduire de plus de 75% des besoins énergétiques de chauffage et de climatisation par rapport à la configuration de référence pour toutes les zones climatiques étudiées.

## Perspectives

- ✓ Chercher la combinaison des paramètres qui permet de satisfaire les exigences prédéfinies par les normes ou les labellisations thermiques,
- ✓ Prendre en compte l'impact économique et environnemental,
- ✓ Application de cette méthodologie à d'autres types de bâtiments de type tertiaire,
- ✓ Application de cette méthodologie pour la réhabilitation des bâtiments existants.