



La modélisation thermique confrontée à la mesure :

Influence de l'imprécision des données d'entrées sur le calcul de la consommation de chauffage

I

La problématique de l'évaluation et de la modélisation de la consommation énergétique effective des bâtiments

II

Analyse de sensibilité et d'incertitude sur la consommation d'énergie calculée par plan d'expérience factoriel

III

Résultats et mise en perspective

I - La problématique de l'évaluation et de la modélisation de la performance énergétique des bâtiments

Évaluer et modéliser la performance énergétique effective des bâtiments

Problématique

- Constat opérationnel :
 - ✓ les consommations prévisionnelles des constructions neuves ou des réhabilitations ne sont pas au rendez-vous
- Constat scientifique :
 - ✓ les simulations thermiques non calées par expérimentation présentent un écart significatif par rapport aux consommations effectives [Reddy, 2005]

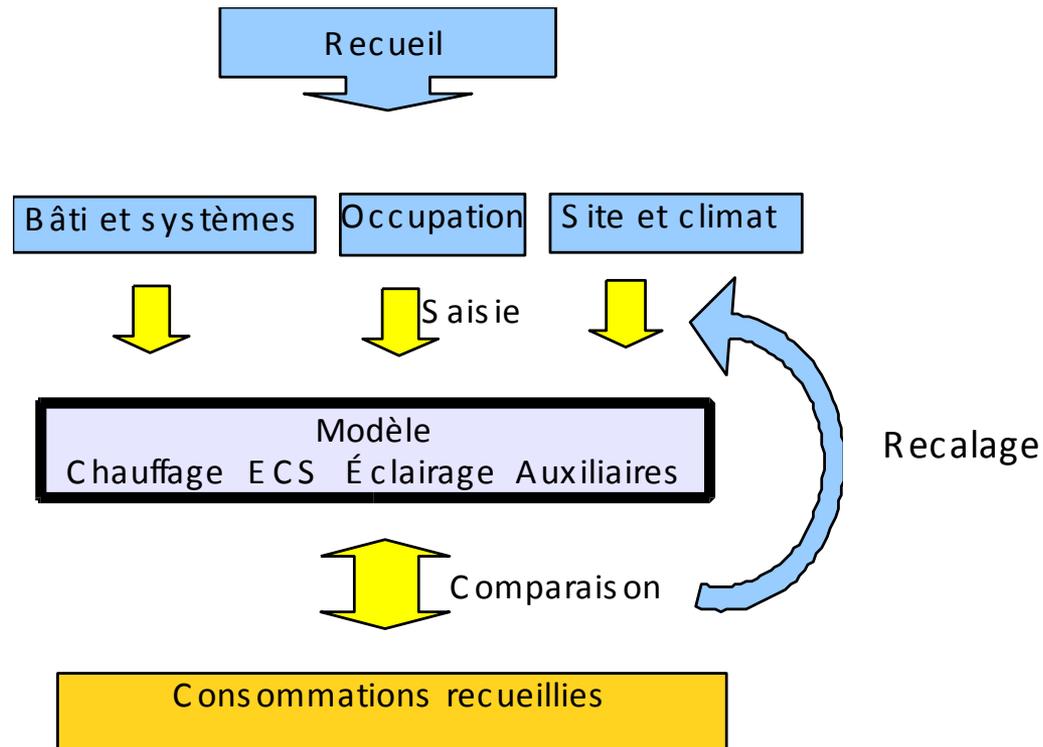
Évaluer et modéliser la performance énergétique effective des bâtiments

La pertinence du choix des travaux et la précision du calcul de consommation dépend :

- du modèle et de ses hypothèses de calcul
 - ✓ Hypothèse du modèle sur le phénomène modélisé : hygroscopie des matériaux, inertie, aéraulique, etc.
 - ✓ Méthode numérique de résolution
- de l'incertitude des caractéristiques du bâtiment
 - ✓ Simplifications nécessaire à la saisie : gains internes, géométrie, etc.
 - ✓ Caractéristiques des produits : issus de données (pas toujours) disponibles dans les catalogues, base de données
 - ✓ Difficulté ou complexité de la mesure de certaines caractéristiques du bâti ou des systèmes

Evaluation et modélisation de la performance énergétique : les enjeux

Exemple de l'audit : création d'un modèle de calcul de la consommation d'énergie du bâtiment existant



Evaluation et modélisation de la performance énergétique : les enjeux

Un impact sur le calcul avant travaux non négligeable



École primaire (22) de 1966, extension de 1982, chauffée à électricité avec une consommation de chauffage annuelle calculée de 205,8 kWh/m².an (CEBO)

- Erreur sur le calcul de consommation de chauffage due à l'incertitude sur les données d'entrée : de **0,1 à 20%** selon le mode de recueil de la donnée (relevé visuel, mesure, etc.)
- A comparer à l' écart observé entre deux modèles Th-CE exo et Pléaides-comfie sur la consommation de chauffage : **5%**

Evaluation et modélisation de la performance énergétique : exemple de l'audit

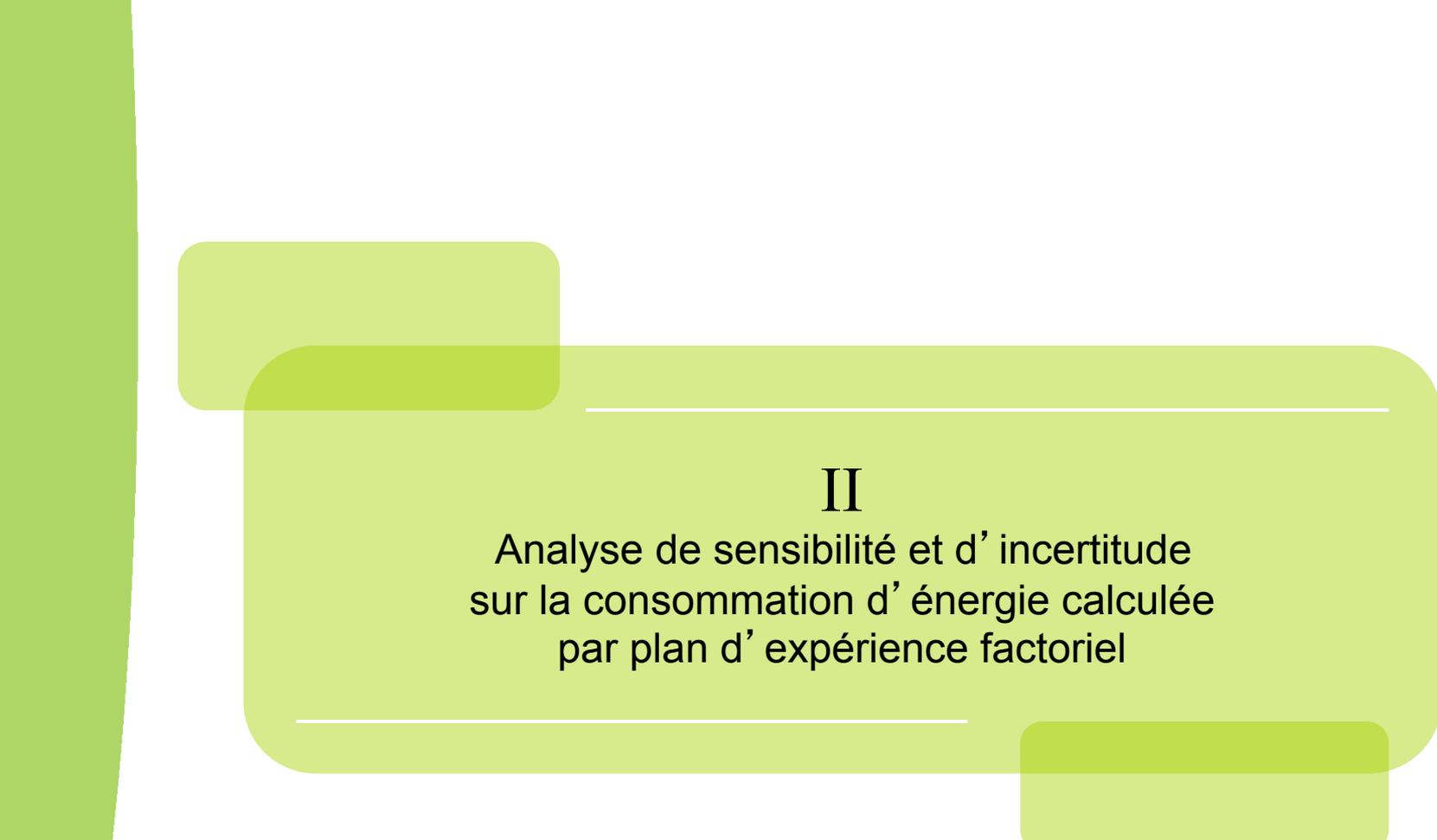
Un impact sur le calcul avant travaux non négligeable

✓ Après travaux :



Méthode de collecte des données	École primaire		Logement collectif	
	Audit de base	Suivi instrumenté	Audit de base	Suivi instrumenté
Gain énergétique prévisionnel après travaux (*)	66%	9%	28%	4%

(*) Résultats des calculs d'économies d'énergie (Th-Cex) après réhabilitation pour une école primaire et un logement collectif - programme CEBO



II
Analyse de sensibilité et d'incertitude
sur la consommation d'énergie calculée
par plan d'expérience factoriel



Analyse de sensibilité par plan expérience factoriel fractionnaire

Objectif :

- déterminer les caractéristiques, dont l'incertitude a le plus d'influence sur le calcul de la consommation d'énergie
 - celles-ci devront être recueillies avec le plus de précision possible
- Méthode : recours à l'analyse de sensibilité par plan d'expérience

Analyse de sensibilité par plan expérience factoriel fractionnaire

Principe du plan expérience

- Sélectionner et ordonner les essais afin d'identifier à moindre coût les effets des paramètres sur la réponse du modèle/produit

Méthode statistique en 5 étapes :

- ✓ Postuler un modèle de comportement du système
- ✓ Relation mathématique donnant la réponse du système en fonction, entre autre, des facteurs
- ✓ Définir le plan d'expérience
- ✓ Faire les essais
- ✓ identifier les coefficients du modèle par analyse statistique le cas échéant

Analyse de sensibilité par plan expérience factoriel fractionnaire

Choix du plan factoriel

Avantage :

- Méthode de détection des facteurs influents
- Nombre de simulations limité

Inconvénient

- Moins précis sur le résultat du calcul du niveau d'erreur total résultant que des méthodes nécessitant plus de calculs (Monte-Carlo par ex)

Analyse de sensibilité par plan expérience factoriel fractionnaire

Méthode déterministe et invariant

- ✓ Ne dépend que des facteurs testés
- ✓ Plan non aléatoire

Modèle de comportement :

Hypothèse de linéarité de la réponse par rapport à chacun des facteurs pris séparément

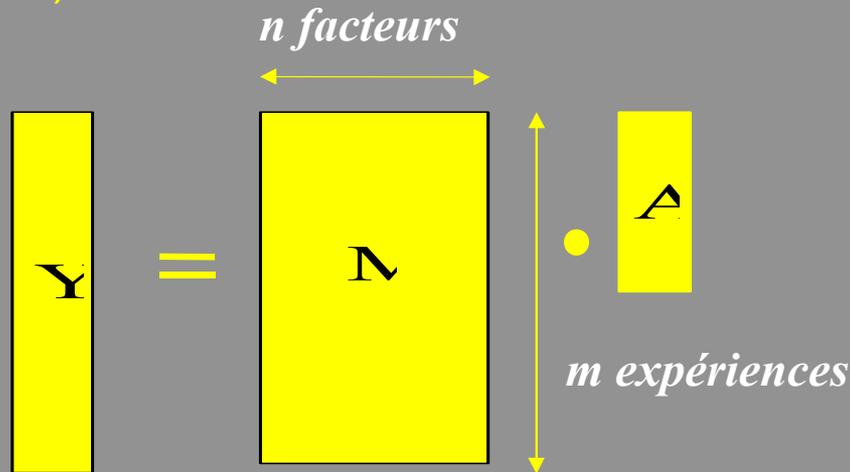
$$y = \mu + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^{i=k-1} \left(\sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j \right) + \sum_{i=1}^{i=k-2} \left(\sum_{j=i+1}^{j=k-1} \left(\sum_{l=j+1}^k a_{ijl} x_i x_j x_l \right) \right) + \dots + a_{1\dots k} x_1 x_2 \dots x_k$$

Analyse de sensibilité par plan expérience factoriel fractionnaire

Construction du plan

$$y = \mu + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^{i=k-1} \left(\sum_{j=i+1}^{j=k} a_{ij} x_i x_j \right) + \sum_{i=1}^{i=k-2} \left(\sum_{j=i+1}^{j=k-1} \left(\sum_{l=j+1}^{l=k} a_{ijl} x_i x_j x_l \right) \right) + \dots + a_{1\dots k} x_1 x_2 \dots x_k$$

Système d'équations à m inconnues ($\mu, a_i, a_{ij}, a_{ijl}, \dots$) et m équations (= m expériences)

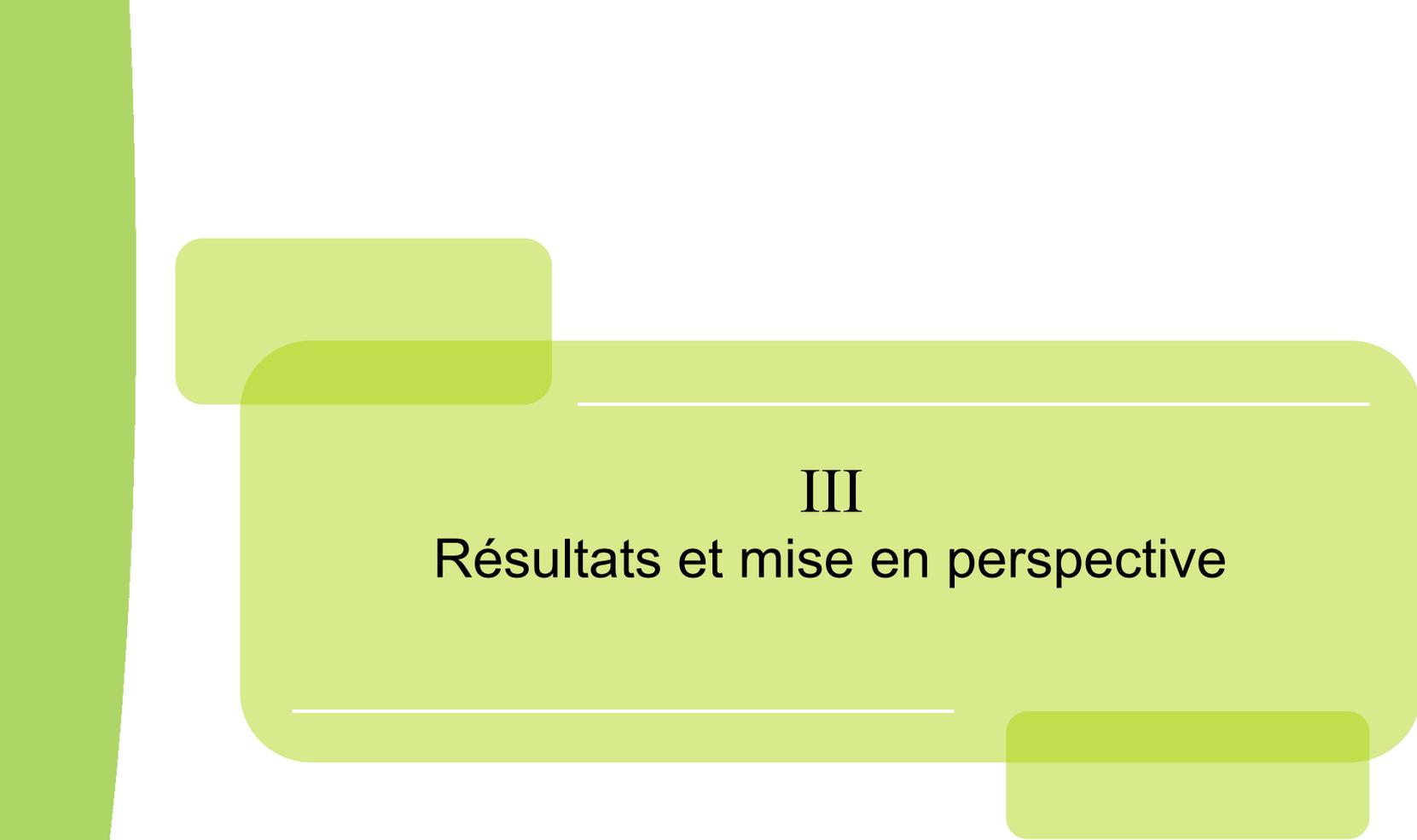


$$m = 2^n$$

$$\mathbf{M}^t \mathbf{M} = \mathbf{I}_m$$



$$\mathbf{A} = \frac{1}{m} {}^t \mathbf{M} \mathbf{Y}$$



III

Résultats et mise en perspective



Résultats et mise en perspective

Résultats issus de deux projets de recherche :

- CEBO (Consommation Effective des Bâtiments Occupés) CETE Ouest / CSTB pour le MEEDE /DGALN (2008-2012)
 - ✓ Développer une méthode d'évaluation de la performance énergétique du bâtiment basé sur le calcul complété par quelques points de mesures à identifier
- Atelier de recherche GPE (Garantie de la Performance Energétique) pour la Fondation Bâtiment Energie (en cours)
 - ✓ Visant à développer une méthodologie permettant de garantir la consommation énergétique d'un réhabilitation facteur 2 ou 4 d'un bâtiment tertiaire ou collectif

Résultats et mise en perspective : école primaire (CEBO)



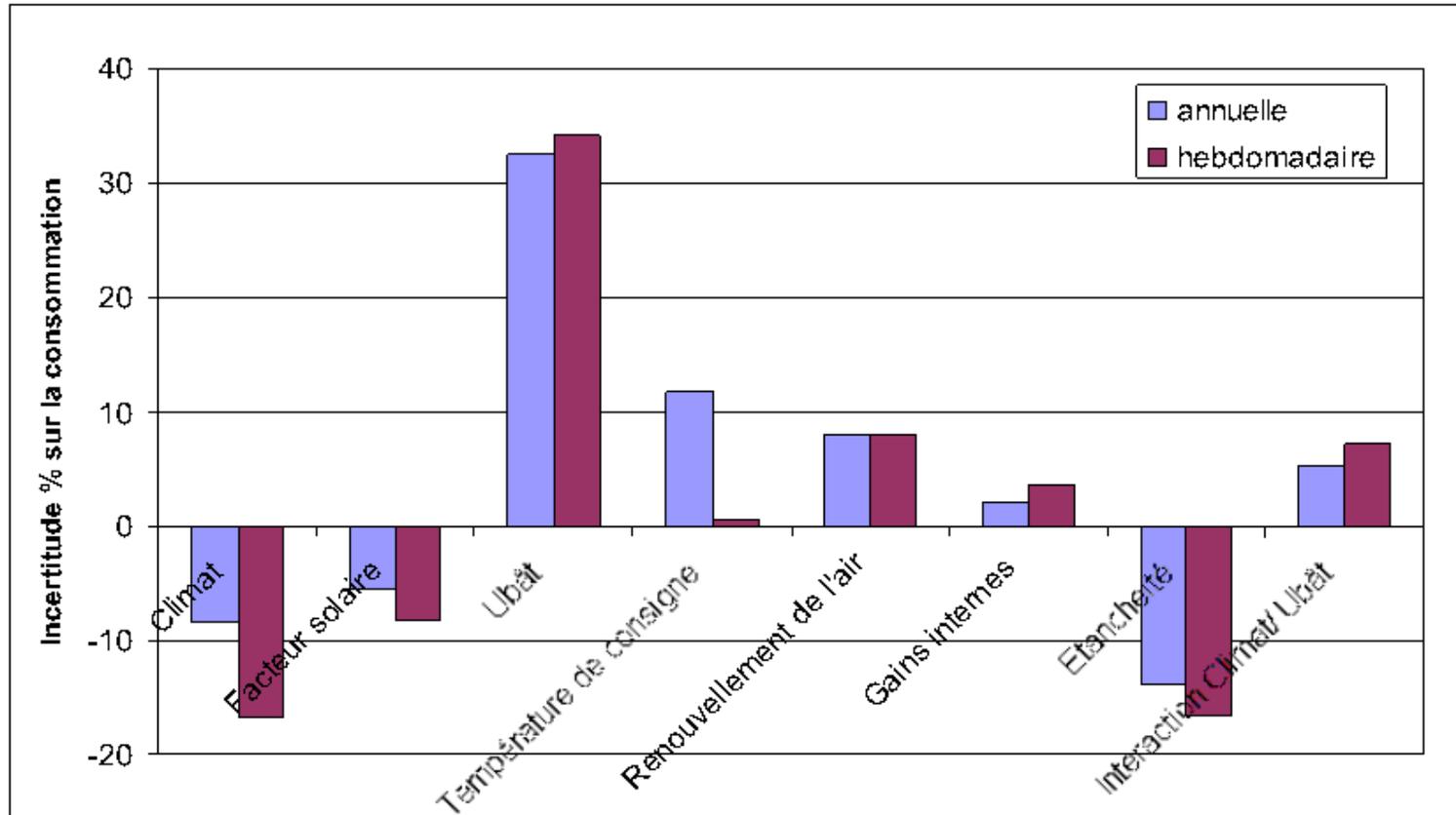
- Instrumentation sur 1 an et mesures horaires de :
 - ✓ de l'ambiance intérieure : températures, humidité relative,
 - ✓ Consommations électriques de chauffage
 - ✓ Consommation électrique d'éclairage
- Mesure de étanchéité à l'air du bâtiment selon NF EN 13829
- Evaluation de la transmission thermique de l'enveloppe avec la méthode EBBE (Berger et al 2010)
- Calibration sur la ventilation naturelle, seule paramètre non mesuré



Résultats et mise en perspective : école primaire (CEBO)

	Suivi instrumenté (-1)	Audit (+1)
Climat	Station Boqueho	Climat conventionnel
Facteurs solaires	Masques modélisés	Simple vitrage sans masques
Ubât en W/ (m².K)	EBBE : 0,652	Calcul théorique du Ubât: 1,282
Q4Pa-surf (m³/h.m²)	Mesure : 4,64 +/- 1,16	Convention : 1,7
Température de consigne	Mesure de la température d'air	Convention : 19°C (+ à 2,5°C)
Ventilation	Débit nul	Débit hygiénique réglementaire: 3285 m ³ /h.m ²
Gains internes dus à l'occupation	enquête et mesure : 14,64W/m ²	Convention : 7W/m ²

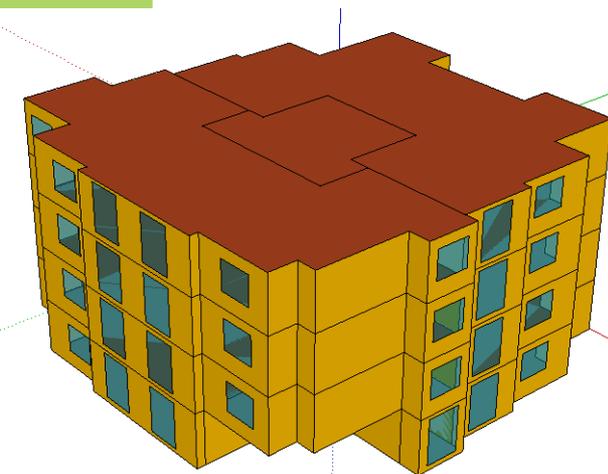
Résultats et mise en perspective : école primaire (CEBO)



Consommation moyenne annuelle 2010 : **256,7 Whép/m².a**

Consommation moyenne semaine n°10 : **10,2 kWhép/m².a**

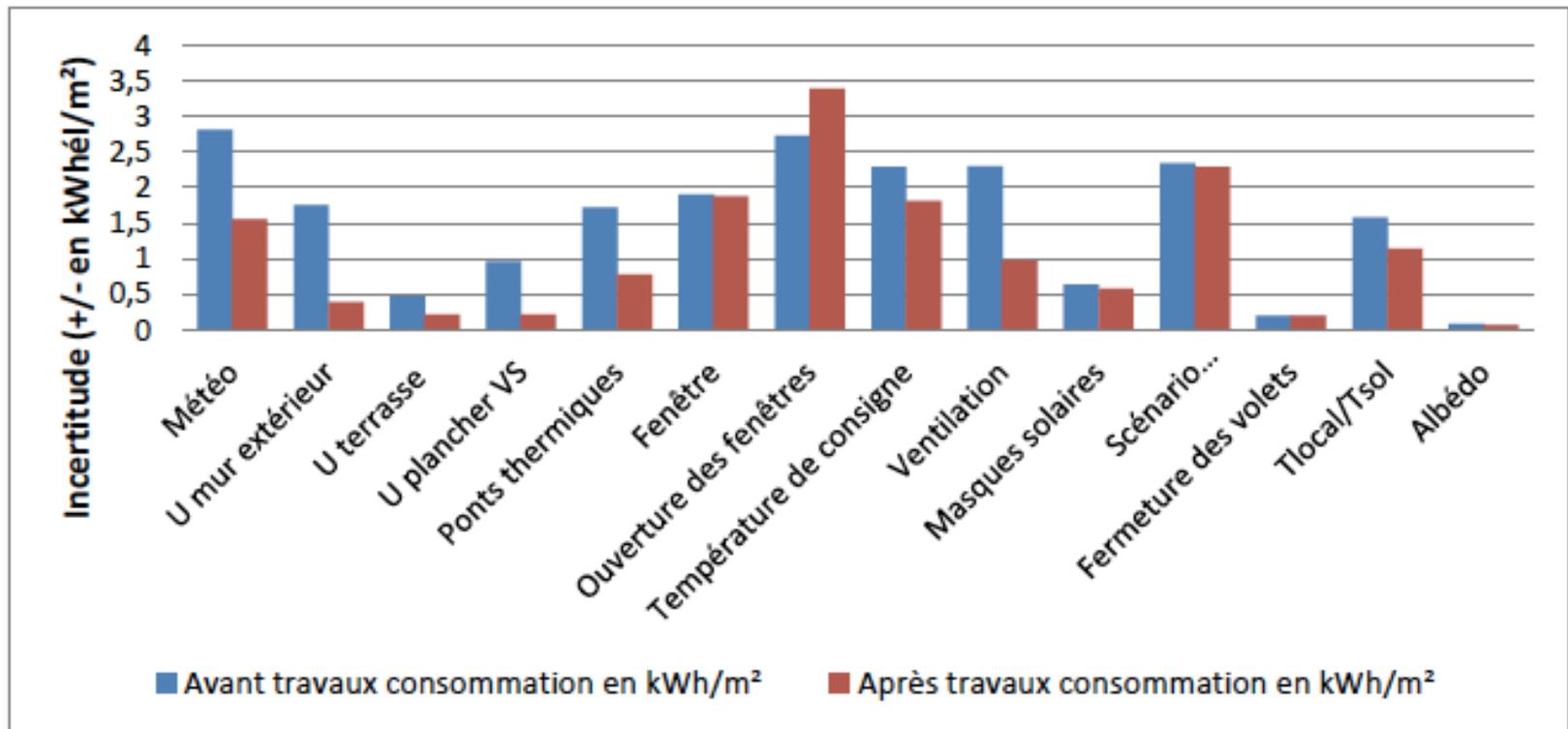
Résultats et mise en perspective : logement collectif construit en 1978 (FBE GPE)



Paroi	Avant travaux	Après travaux	Commentaires
Mur extérieur	Béton plein 15 cm Polystyrène expansé 6 cm	Polystyrène expansé 10 cm Béton plein 15 cm Polystyrène expansé 6 cm	
Plancher VS	Béton plein 16 cm Polystyrène extrudé 3 cm	Béton 16 cm Flocage coupe-feux 8 cm (R=2,28 m ² .K/W)	50% de l'isolation est effective
Fenêtre	Vitrage 4/12/4	Vitrage 4/12/4	Changées en 2004
Terrasse	Béton plein 20 cm + polyuréthane 5 cm	Béton plein 20 cm + 100 mm polyuréthane (R=3,33 m ² .K/W)	Rénovée en 2006/2007
Systèmes	Avant travaux	Après travaux	Commentaires
VMC	VMC simple flux auto-réglable	VMC Simple flux hygro B	
Chauffage	- Plancher chauffant électrique - Appoint par convecteurs électriques	Chaufferie collective	
ECS	Cumulus électrique individuelle	Installation solaire collective	

Résultats et mise en perspective : logement collectif construit en 1978 (FBE GPE)

- Consommation de chauffage avant travaux de 360 kWhep/m²_{SHAB}/an
- Consommation de chauffage après travaux de 38 kWhep/ m²_{SHAB}/an



Résultats et mise en perspective

Conclusion et perspectives

- Caractéristiques influentes à mesurer
 - ✓ Etanchéité à l'air, débits de ventilation, température de consigne, climat
- Modèles d'identification à continuer à développer
 - ✓ Transmission thermique de l'enveloppe, débits de ventilation
- Prise en compte de modèle d'occupation stochastique à développer
 - ✓ scénario d'occupation et de gains internes, d'ouverture de fenêtres
- Amélioration des modèles :
 - ✓ Prise en compte du vieillissement des matériaux, de l'hygroscopie des matériaux « anciens » ou bio-sourcés, couplage thermo-aéraulique, etc.

Références

Berger, J., Tasca-Guernouti, S., Humbert, M., 2010. Experimental method to determine the energy envelope performance of buildings, *10th International Conference for Enhanced Building Operations (ICEBO)*, 26-28 octobre 2010, Kuwait

De Wit S., Augenbroe G., Hensen J. L. M., 2002. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications, *Energy and Buildings* 3, 951-958

Fürbringer, J.-M., 1994. *Sensibilité de modèles et de mesures en aéraulique du bâtiment à l'aide de plans d'expériences*. Ph. D. thesis nr. 1217. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland

Lomas. KJ, Eppel H, 1992, Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs, *Energy and Building*, 19, 21-24, De Montfort University Leicester (UK)

Méthode de calcul TH-C-E ex, 2008, Annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul TH-C-E ex, *Journal officiel de la république française du 10 octobre 2008*, France

Montgomery, D.C., 1997. *Design and analysis of experiments*. 4th ed. John Wiley & Sons, New-York

Morris, M.D, 1991. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics* v33 n2.161-174

Reddy, T.A., 2005. Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools. *ASHRAE Transactions*. Volume 112

Évaluer et modéliser la performance énergétique effective des bâtiments

La consommation d' énergie d' un bâtiment dépend de :

- du climat et du site

- ✓ Température extérieure, humidité relative, vitesse et orientation du vent, rayonnement solaire, masques solaires, etc.

- de l' occupation

- ✓ Taux d' occupation, horaires d' occupation, apports internes liés aux équipements électrique, température de consigne, action de l' occupant sur les volets, stores et l' ouverture des fenêtres, etc.

- du bâti

- ✓ Transmission thermique et étanchéité de l' enveloppe

- des systèmes

- ✓ Rendement du système de chauffage, de production d' eau chaude sanitaire et de froid, débits de ventilation, éclairage, etc.



Evaluation et modélisation de la performance énergétique : les enjeux

Difficulté de caractériser l'état initial en audit

- ✓ Difficulté de connaître les matériaux mis en œuvre : DOE, s'il existent, pas toujours exacts
- ✓ Impossibilité de quantifier la qualité de la mise en œuvre initiale et de sa dégradation
- ✓ le temps imparti pour le recueil des données élimine ou simplifie tout relevé fastidieux : relevé des métrés, relevé de la puissance d'éclairage installée, enquête d'occupation, ...
- ✓ Complexité de certaines mesures : débits de ventilation naturelle
- ✓ Difficulté de réaliser des mesures sur le long terme : données météo, débits de ventilation hygroréglable, ...
- ✓ Simplifications pratiquées : température de consigne à 19°C par défaut ou assimilée à la température mesurée, prise en compte d'un rendement moyen pour le système de chauffage, pas de mesure d'étanchéité à l'air, ...

Analyse de sensibilité par plan expérience factoriel fractionnaire

Visualisation des résultats

✓ Effet principal

$$E_1 = \hat{\mu}_+ - \hat{\mu}_- = \frac{\overbrace{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}^{x_1 \text{ au niveau } +1}}{4} - \frac{\overbrace{y_5 + y_6 + y_7 + y_8}^{x_1 \text{ au niveau } -1}}{4}$$

✓ Interactions

$$E_{12} = \frac{1}{2} \left(\underbrace{\left(\frac{y_1 + y_2}{2} - \frac{y_5 + y_6}{2} \right)}_{\text{Effet moyen de } \hat{\mu} \text{ à } x_2 = +1} - \underbrace{\left(\frac{y_3 + y_4}{2} - \frac{y_7 + y_8}{2} \right)}_{\text{Effet moyen de } \hat{\mu} \text{ à } x_2 = -1} \right)$$

Résultats et mise en perspective : école primaire (CEBO)

Consommation
moyenne annuelle
2010 :

256,7 Whep/m².y

Consommation
moyenne semaine
n°10 :

10,2 kWhep/m².y

Incertitude (%)	Consommation sur l'année (2010)	Consommation sur la semaine (10)
Climat	-8,4	-16,8
Facteur solaire	-5,4	-8,2
Ubât	32,5	34,2
Température de consigne	11,8	0,6
Débits d'air	8,1	8,1
Gains internes	2,2	3,6
Etanchéité	-13,9	-16,7
Interaction Climat/Ubât	5,3	7,2