

L'utilisation de la simulation dans les démarches d'audit HVAC

Philippe ANDRE – Stéphane BERTAGNOLIO
Université de Liège



Plan de l'exposé

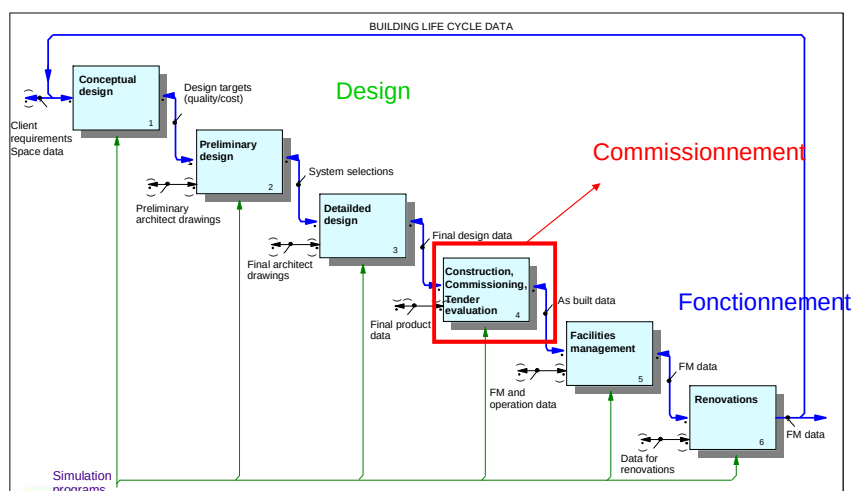
- L'audit énergétique des systèmes HVAC dans les bâtiments
- Les outils de calcul disponibles pour l'audit
- Spécificités des évaluations en phase d'audit
- Une démarche issue du projet HarmonAC
- Etude de cas
- Perspectives



L'audit énergétique des systèmes HVAC dans les bâtiments



Cycle de vie d'un bâtiment



Audit énergétique des systèmes HVAC dans les bâtiments

- Terme **générique** qui peut regrouper différentes types d'actions
 - Visite du site et inspection sommaire
 - Relevé et analyse des factures énergétiques
 - Exploitation des données recueillies par le système de gestion du bâtiment
 - Déploiement d'instruments de mesure et réalisation de campagnes

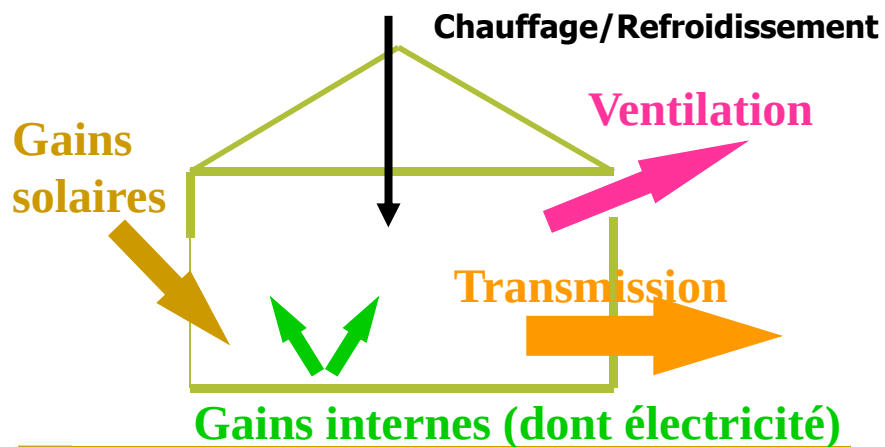


La vision réglementaire

- Se situe dans le cadre de la « Directive Européenne sur la performance énergétique des bâtiments », transposée dans chacun des états-membres:
- Deux aspects:
 - **Certification** énergétique des bâtiments
 - **Inspection** des systèmes de chauffage et de climatisation



Le but ultime de l'audit: capturer l'information sur les flux d'énergie dans un bâtiment



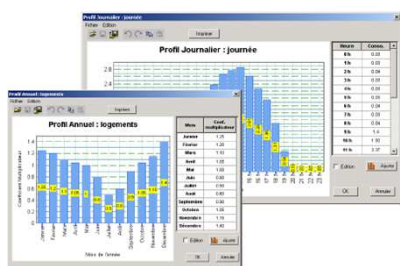
Objectifs d'un audit énergétique

- Analyser les consommations énergétiques d'un bâtiment existant
 - en rapport avec les caractéristiques du **bâtiment** et de l'**équipement** consommateur d'énergie
 - En rapport avec la finalité d'un bâtiment: assurer un certain niveau de bien-être (**confort**) dans le bâtiment



Principes généraux

- Utilisation conjointe de deux types d'information, à des degrés divers:
 - « mesure » d'une consommation d'énergie réelle
 - « calcul » ou évaluation de la consommation d'énergie



Université de Liège

Les outils de calcul disponibles pour l'audit

Outils de calcul

- Bases de données de référence
- Méthodes de calcul « simplifiées »
 - Méthode type « degrés-jours » ou de « signature énergétique »
- Méthodes de calcul « détaillées »
 - calcul statique
 - simulation dynamique

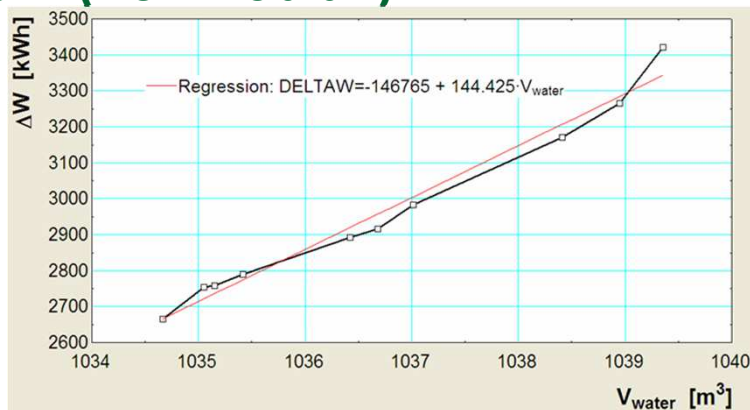


Bases de données de référence

- Contiennent des « ratios » pour un certain nombre de bâtiments:
 - consommation d'énergie/m²
 - consommations électriques/m²
 - consommation d'eau/utilisateur
- Qualité de l'outil fonction de:
 - nombre d'observations introduites
 - variété des typologies de bâtiment



Electricity consumption as function of water consumption in January 2011 (from Lebrun)



Slope is nearly constant

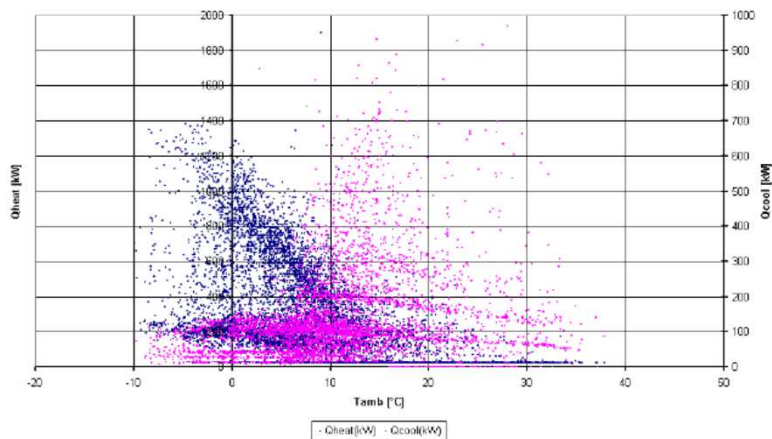


Méthodes de calcul type « degrés-jours » ou signature énergétique



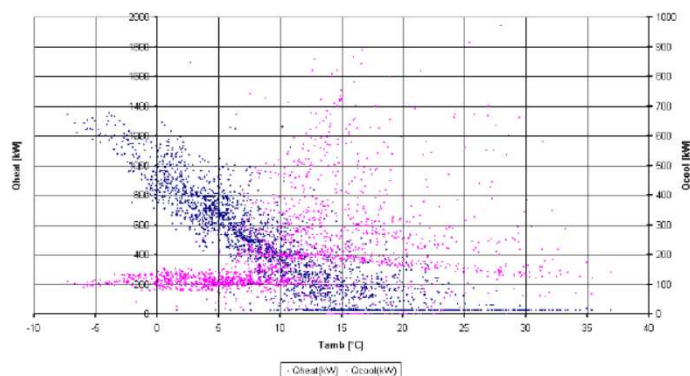
Demandes du bâtiment brutes

Demandes en chaud et en froid du CA-MET en fonction de la température extérieure



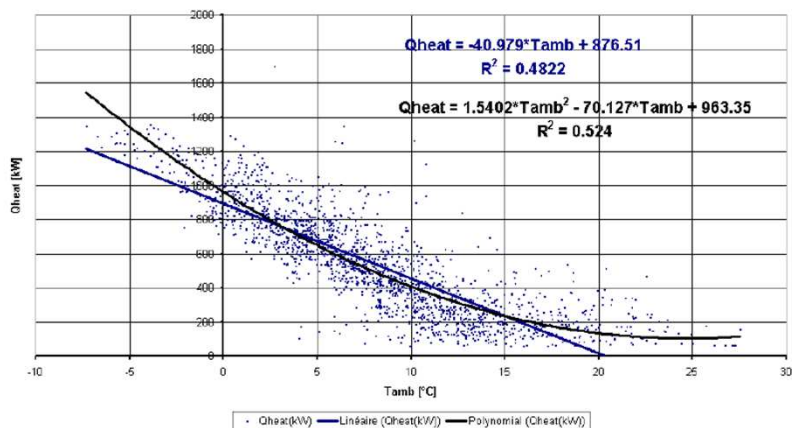
Demandes du bâtiment limitées aux périodes d'occupation

Demandes en chaud et en froid du CA-MET en fonction de la température extérieure (de 09:00 à 17:00 hors Week-End)



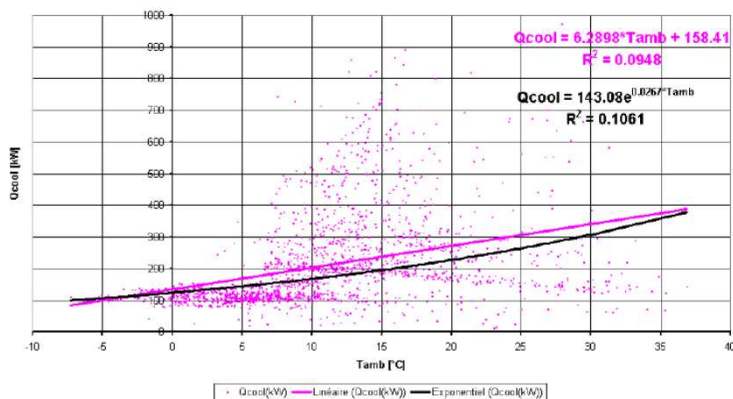
Demande de chaleur du bâtiment: tentative de signature

Demandes en chaud du CA-MET en fonction de la température extérieure (de 09:00 à 17:00, hors Week-End et retrait des valeurs < 1 m³/gaz/h)



Demande de froid du bâtiment: tentative de signature

Demandes en froid du CA-MET en fonction de la température extérieure (de 09:00 à 17:00, hors Week-End et retrait des valeurs < 0 kW)



Modèles de calcul statiques

- Calculent le comportement d'un bâtiment en négligeant son inertie -> supposent la réponse du bâtiment instantanée
- Considère le bâtiment comme une « zone » ou le divise en plusieurs zones
- Convient pour des calculs de consommation portant sur une longue période (1 an)



Modèles de calcul dynamiques

- Prise en compte des phénomènes transitoires (mettant en jeu l'inertie du bâtiment)
- Convient pour analyses plus fines:
 - calcul d'évolutions de températures
 - interactions bâtiment/installations
 - analyse de la régulation
 - analyse complète d'un bâtiment et de son système énergétique



Paramètres des méthodes de calcul

- Analyse du bâtiment:
 - données des parois
 - taux de renouvellement de l'air
 - Niveau de confort effectif dans les différentes parties du bâtiment
- Analyse des équipements:
 - production/distribution/émission de chaud et de froid
 - production/distribution d'eau chaude sanitaire
 - installations de ventilation mécanique
 - systèmes d'éclairage
 - Autres équipements consommateurs d'énergie



Spécificités des calculs dans une phase d'audit énergétique



La situation difficile de l'auditeur énergétique

Information globale et limitée

- Facture énergétiques mensuelles
- Données « as-built » souvent incomplètes voire inexistantes
- Mesures in-situ



Contraintes pratiques

- Temps
- Argent

Réponses à donner

- Analyse de la consommation énergétique
- Identification des postes de consommations
- Identification des opportunités d'économie d'énergie
- Evaluation quantitative des opportunités d'économie d'énergie

Les mesures et la comptabilité énergétiques

demeurent onéreuses – La simulation est par contre de plus en plus abordable!



A quoi peuvent servir les modèles dans le contexte d'un audit énergétique?

Avantages

- + Désagrégation des consommations
- + Identification des ECOs
- + Evaluation des ECOs (quand les mesures sont impossibles)
- + Commissionnement « continu » et vérification de performances
- + Confirmation de la connaissance du bâtiment par l'utilisateur
- + Documentation des conditos « de base » (baseline)

Limitations

- Le modèle reste une abstraction de la réalité
- L'utilisation d'un modèle pour analyser une situation existante peut être difficile
- Un compromis doit être trouvé entre: **précision-simplicité-flexibilité**
- Disponibilité et incertitudes sur les données pour vérifier la validité d'un modèle



Simuler une situation existante est un problème complexe

- Besoin d'un modèle du Bâtiment qui représente de manière suffisamment proche le **comportement réel** du bâtiment objet de l'analyse
 - Utilisation de modèles non calibrés → différences entre **30%** (énergie totale utilisée) et **90%** (postes individuels comme la co,sommation d'eau chaude...)
- Impossible de faire confiance à un modèle non calibré lorsqu'on essaie d'analyser une situation existante

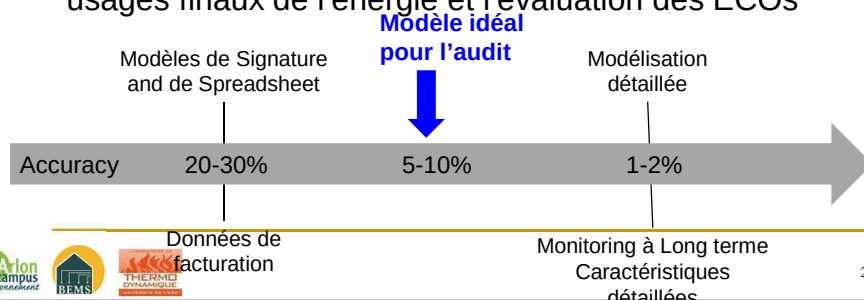


25

Université de Liège

Packages de simulation existants

- **Packages de simulation commerciaux** généralement dédiés au design (Trnsys, Energy+,...)
 - grand nombre de phénomènes physiques pris en compte
 - grand nombre de paramètres
 - incertitude due à l'utilisateur ↑ & compréhension ↓
- **Modèles simple de type "spreadsheet"** pas assez détaillés pour permettre une représentation correcte, l'analyse des usages finaux de l'énergie et l'évaluation des ECOs



26

Université de Liège

Besoins des modèles

- Données météorologiques réelles sur une base horaire
- Représentation du comportement statique et dynamique du bâtiment
- Profils d'occupation et de fonctionnement
- Points de consigne pour les différentes zones et composants HVAC
- Représentation complète du processus de conditionnement d'air
- Quantité limitée de paramètres présentant un **sens physique** et **identifiables**

→ Un modèle de simulation dynamique horaire basé sur une approche séquentielle

Load Secondary Primary Energy-use

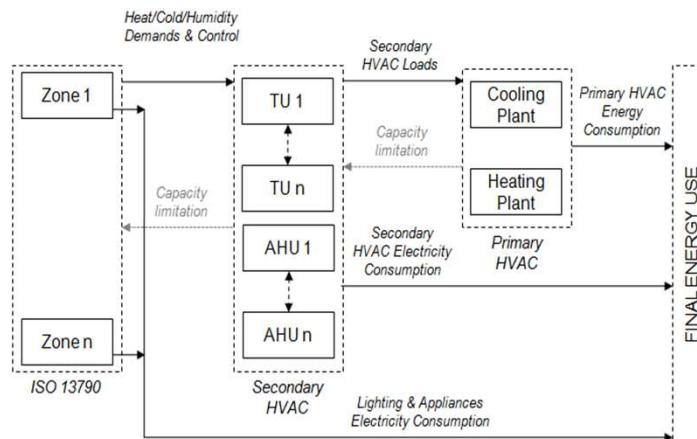
convient pour ce contexte



27

Université de Liège

Résolution Séquentielle (Approche LSPE)



Loads → Secondary → Primary → Energy-use

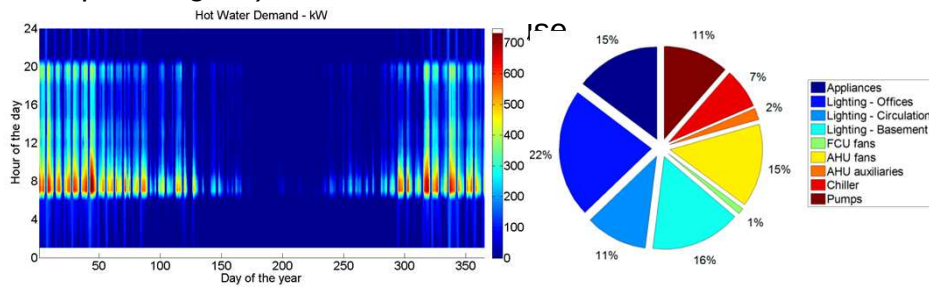


28

Université de Liège

Outputs générés

- Demandes d'énergie spécifiques (par zone, par usage...)
- Consommations d'énergie finale spécifique (par zone, par usage...)



29

Université de Liège

Une méthodologie issue du projet
HarmonAC

HARMONAC



Université de Liège

Une méthodologie (approche « Harmonac »)

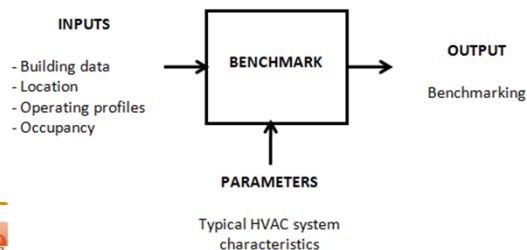
Comment des outils d'évaluation (qui restent simples) peuvent aider l'auditeur ?

- **Benchmarking**: première évaluation de la performance du bâtiment (comparaison entre la consommation réelle et une consommation de référence)
 - **calcul des performances de référence**
- **Pre-audit (ou Inspection)**: étude du système installé, analyse détaillée de la consommation énergétique globale mesurée
 - **“désaggrégation” de la consommation énergétique mesurée**
- **Audit détaillé**: évaluation quantitative des opportunités d'économie d'énergie sélectionnées
 - **comparaison entre options, évaluation des gisements d'économie**
- **Audit “pré-investissement”**: étude détaillée technique et économique



Etape n° 1: Benchmarking

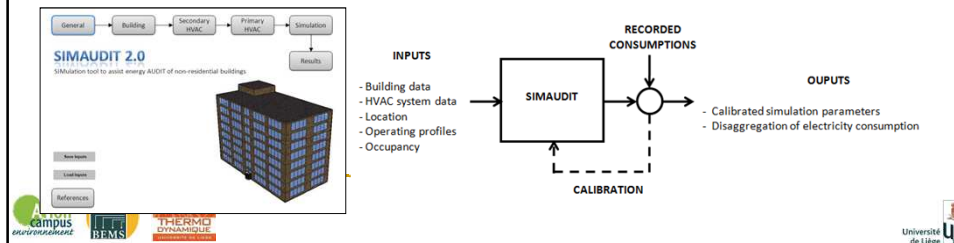
- **Benchmark**
 - Utilisé pour calculer des **performances de référence**
 - Simulation mono-zone du bâtiment réel couplé à un **système de référence typique**
 - Caractéristiques du système basées sur des normes européennes : PrEN13779 / PrEN13053



Etape n°2: Simulation + détaillée

■ SimAudit

- Utilisé pour désagréger les consommations d'énergie mesurées et évaluer les ECOs sélectionnées
- Simulation **Mono-zone ou Multi-zone du bâtiment réel et du système réel** **Calibration** du modèle sur les données mesurées



Inputs et paramètres

■ Inputs (variables)

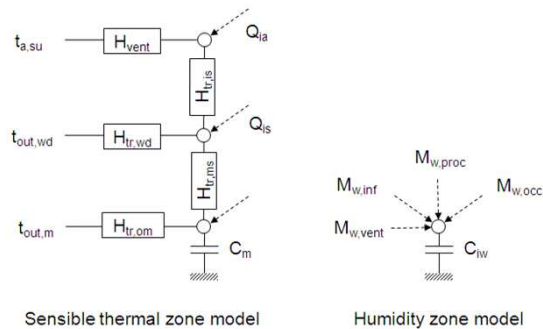
- ❑ Actual weather data
- ❑ Weekly operating and occupancy profiles (hourly values)

■ Parameters (« constants »)

- ❑ Limited amount of parameters to adjust
- ❑ Components models **developed to fit to available information** (physical and identifiable parameters)
- ❑ Examples:
 - Use of a simple 5R1C model to avoid detailed wall descriptions
 - Adapted SFP fan model from EN13779
 - Simple boiler model from EN15316
 - Default values and performance curves for fans, chillers, boilers...
 - Rules of thumb for parameters identification of cooling coil model...

Building zone model

- Simple multizone building model (simple hourly method ISO/EN 13790)
- Water capacitance method

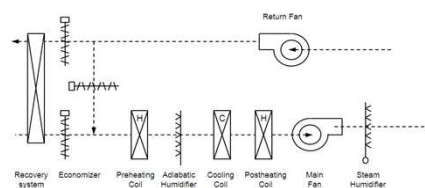


35
Université de Liège

HVAC system model

- **Secondary system** (simple components models)

- All Air (CAV+RH/VAV+RH)
- Air / Water (CAV+TU)
- All Water (TU)



- **Primary system** (empirical & semi-empirical models)

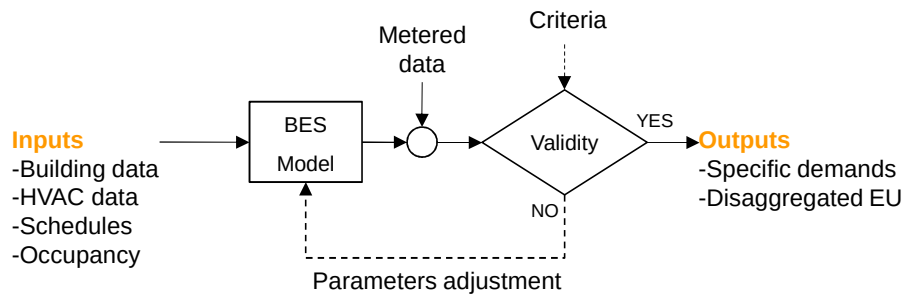
- Hot water boiler (on-off, hi-lo-off, modulating, condensing)
- Air or water cooled chillers (scroll, screw, centrifugal compressors)
- Heat rejection devices (cooling tower, dry fluid cooler)



36
Université de Liège

Etape cruciale en audit : la calibration du modèle

Model calibration = fitting of a building energy simulation model to an existing situation



→ Highly undetermined problem



37
Université de Liège

Existing calibration methods

1. Manual iterative calibration methods (trial-and-error basis)
2. Calibration based on specific graphical representations and comparative displays of the results to orient the calibration process
3. Calibration based on special tests and analytical procedures involving specific intrusive tests and measurements (PSTAR method)
4. Analytical/mathematical automated calibration methods involving use of optimization algorithms.



38
Université de Liège

Problems encountered in practice

- The **adjustment** of the parameters is generally **not systematic** but is related to data availability
- Calibration process highly related to **skills and experience** of the user (totally heuristic approach)
- Final **quality** of the “calibrated” model is generally **not (or badly) controlled**
- **Sensitivity and uncertainty** are crucial issues but generally not studied
- Automated methods are not commonly used and the available **too global billing data** do not allow proper application of optimization methods

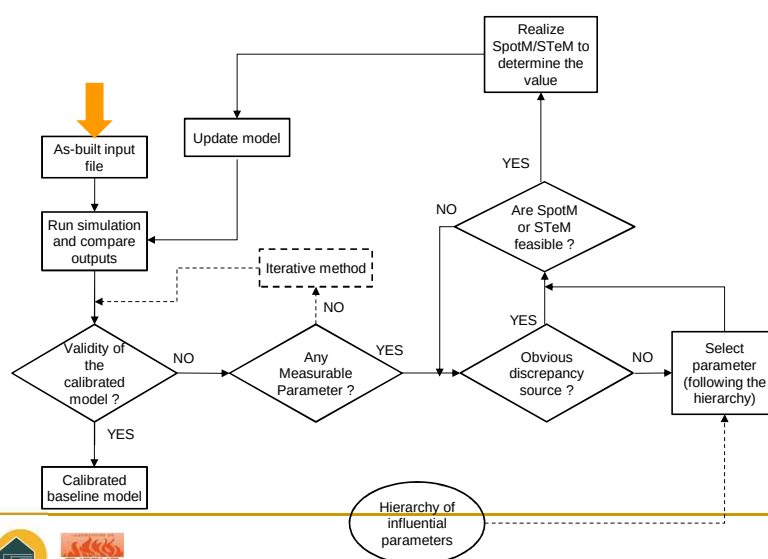


non realistic and bad representation of the behavior of the system

39



Evidence-based calibration process (from S. Bertagnolio)



40



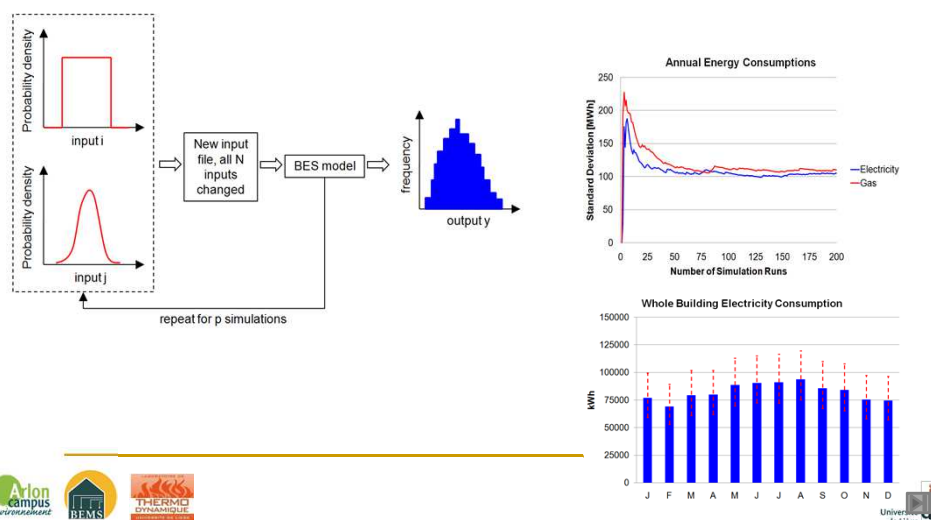
Ressources de la statistique: analyses de sensibilité et de l'incertitude

- **SA**: sensitivity analysis aimed at **identifying factors** which are the source of the uncertainty in the prediction.
- **UA**: Uncertainty analysis aimed at characterizing the empirical probability density function and the **confidence intervals of a given model output**.



41
Université de Liège

Prise en compte de l'incertitude sur les inputs et effet sur les outputs



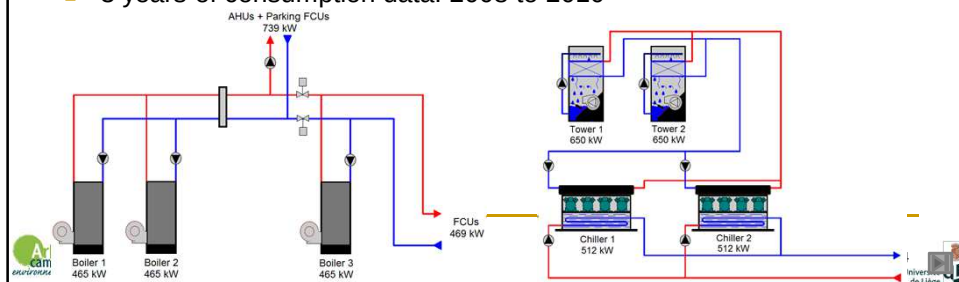
Université de Liège

Un exemple d'application



Case study

- Typical office building located in Brussels (D+ energy rating; Avg : D)
- 10100 m² of usable floor area
- CAV (Adiab. Humidification)+ FCU
- Parking heaters (141 kW)
- 3 x Natural Gas Boilers
- 2 x Water cooled chillers
- 2 x IC Cooling Towers
- 3 years of consumption data: 2008 to 2010



Use of the simulation model in 4 phases

- Use of « as-built » data
- Inspection (short visit on site)
- Monitoring (use of measurement devices in a mid-term campaign)
- User survey

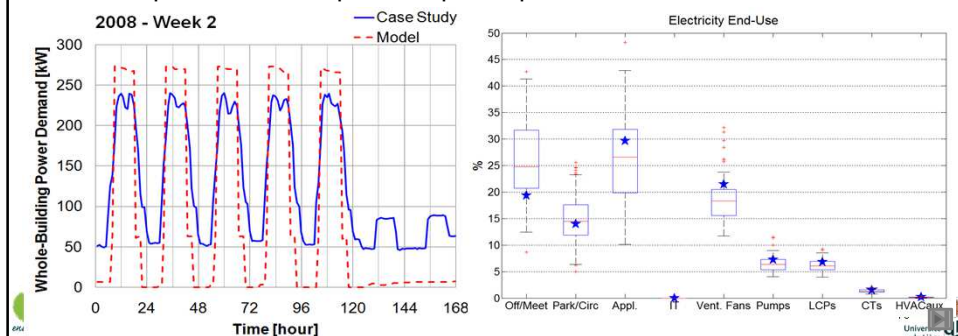


Level 1 – Use of « As-built » data

Complete description of building and HVAC system (nominal perf.)

No information about occupancy and operating conditions/schedules

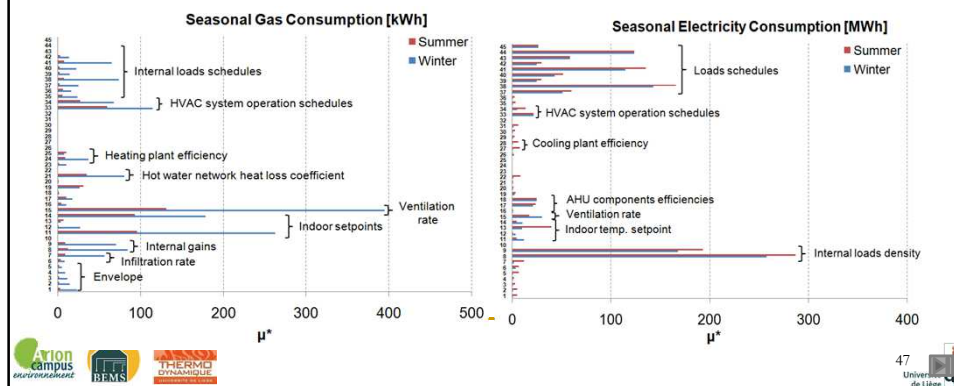
- Acceptable representation of gas & WBE cons.
- Bad representation of peak/off-peak split



Preliminary sensitivity analysis

Focus on:

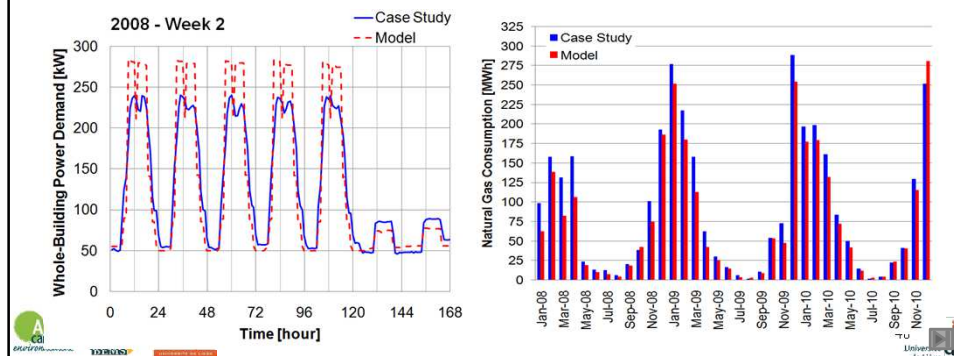
1. Internal loads (power and schedules)
2. HVAC system operation (setpoints and schedules)
3. HVAC components efficiencies



Level 2 – Inspection

Analysis of the BEMS (system schedules and theoretical setpoints)
Survey of installed internal loads densities & IT power

- Acceptable representation of gas cons.
- Good representation of offpeak cons.
- Overestimation of peak cons. (hyp: 100% occupancy/use)



Level 3 – Monitoring phase

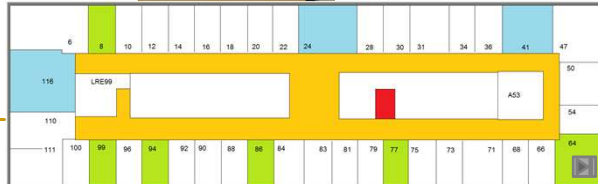
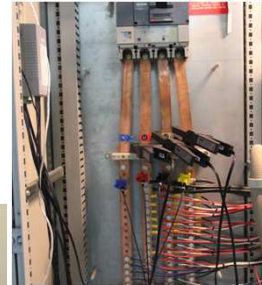
Power metering

- Floor level (lighting & appliances)
- HVAC system parts

Lighting & Appliances use

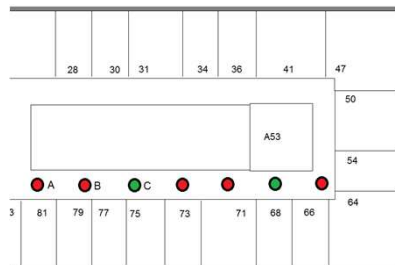
Pumps and fan operation

Indoor Temp. & RH

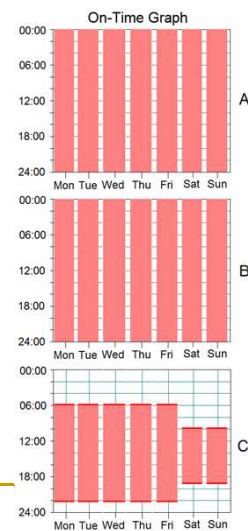


Case Study – Circulation lighting

■ Lighting operation monitoring

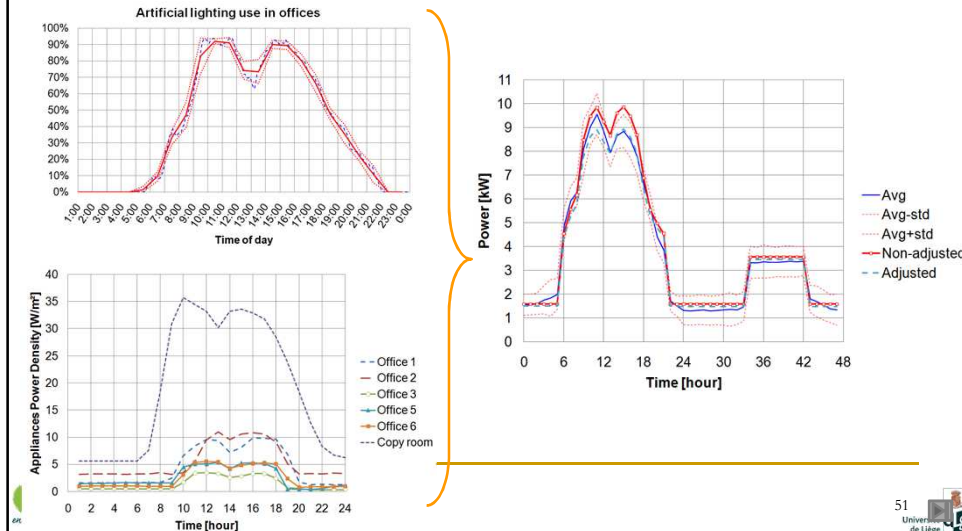


- Always ON
- ON/OFF



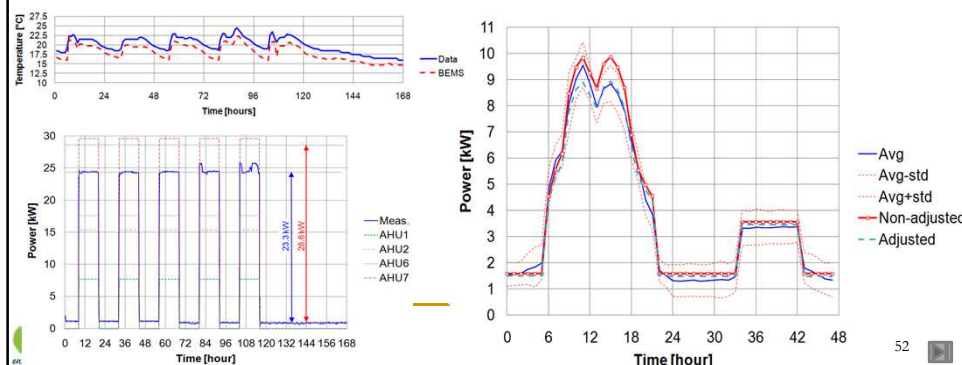
Case Study – Offices lighting & appliances

- Specific and global lighting and appliances monitoring



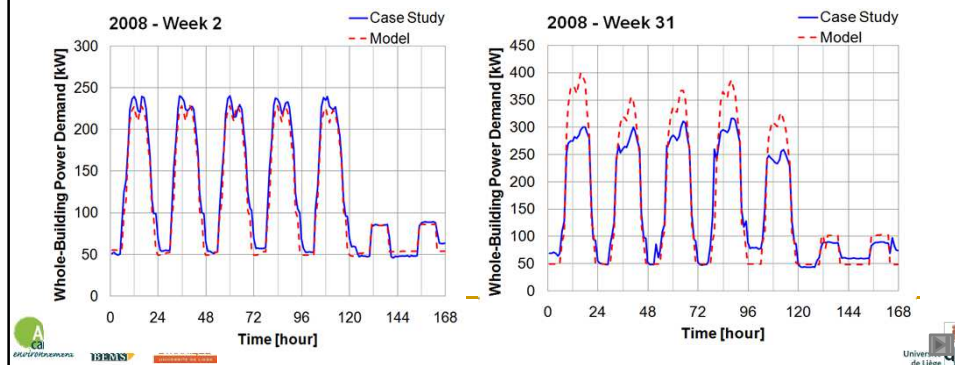
Level 3 – Monitoring phase

- Analysis of floor-level power demand → **85% use rate** → hourly operation profiles
- Achieved temperature: **1.6°C over theoretical setpoint (BEMS)**
- Achieved humidity: **42% (avg) instead of 50%**
- Fan cons.: **82% of nominal absorbed power (as-built)**
- Pump power and operation: ok



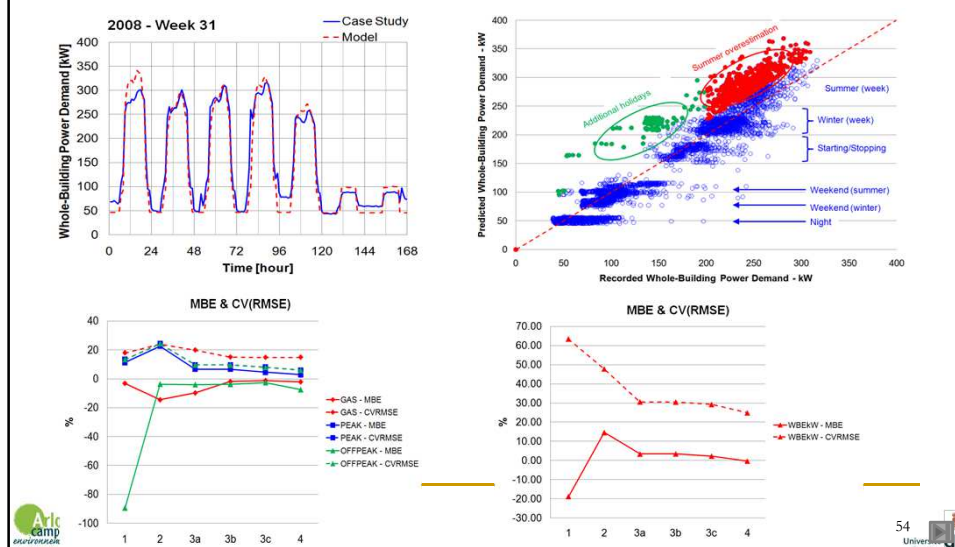
Level 3 – Monitoring phase

- Good representations of both gas and peak/offpeak electricity cons. (MBE & CV(RMSE) < 6%)
- Good representation of winter power demand
- Overestimation of summer power demand (combined effect of less intensive lighting use and holidays ?)



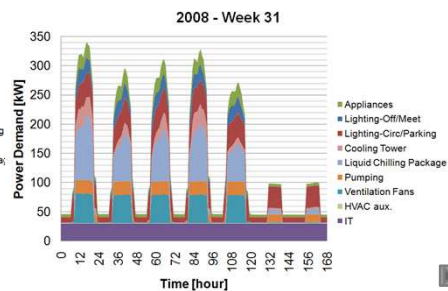
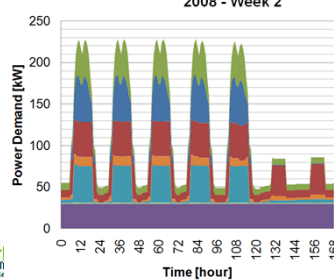
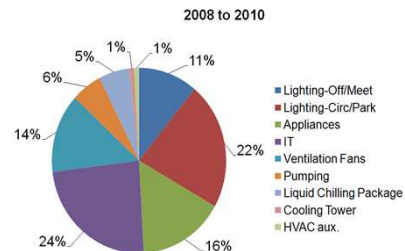
Level 4 – Occupants survey

Identification and estimation of summer holidays period



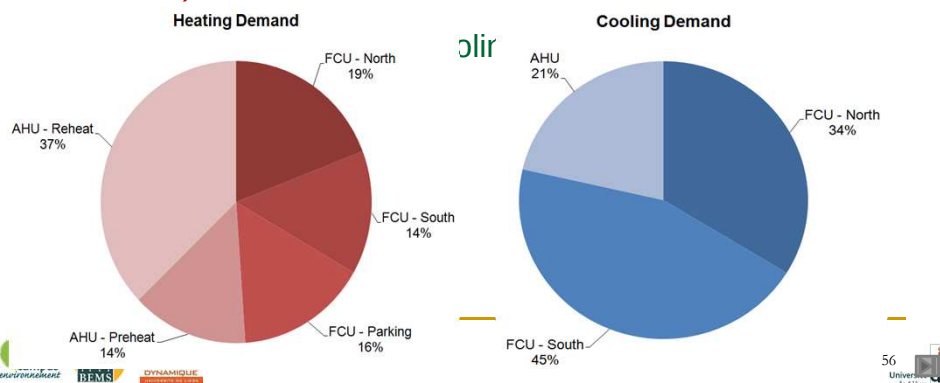
Level 4 – Energy end-use analysis

- Uncertainty is dramatically reduced
- Main electricity consumers:
 - IT
 - Lighting in non-occupancy zones
 - Offices appliances & lighting



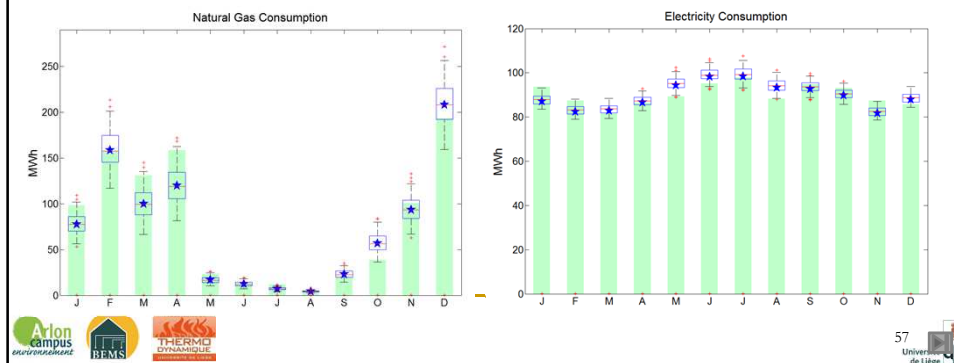
Level 4 – Energy end-use analysis

- Parking heaters: 16% of heat demand
- AHU reheat: 37% of heat demand (high setpoints: 20 to 25°C)
- Offices FCUs: 23% of heat demand (high avg setpoint: 22.6°C)



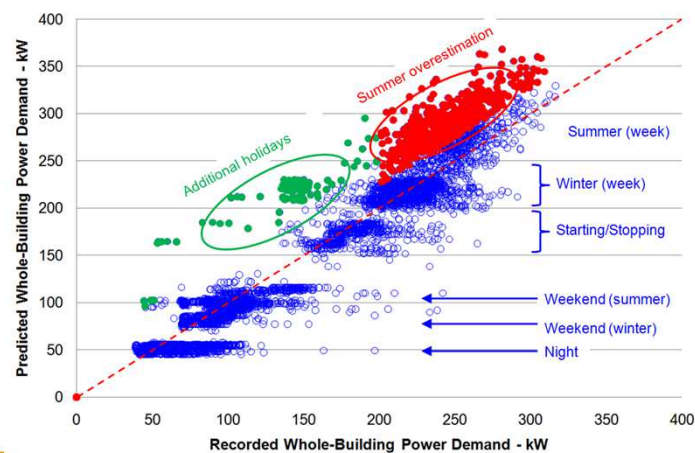
Level 4 – Final uncertainty

- Monthly **gas** consumption: 11% (December) to 22% (July) stddev
- Monthly **electricity** consumption: 2 to 3% stddev
- Uncertainty on predicted gas consumption is significant
- Possible improvement: measurement of ventilation flow rate
- N.B.: signature analysis → gas consumption directly explained by heating and humidification



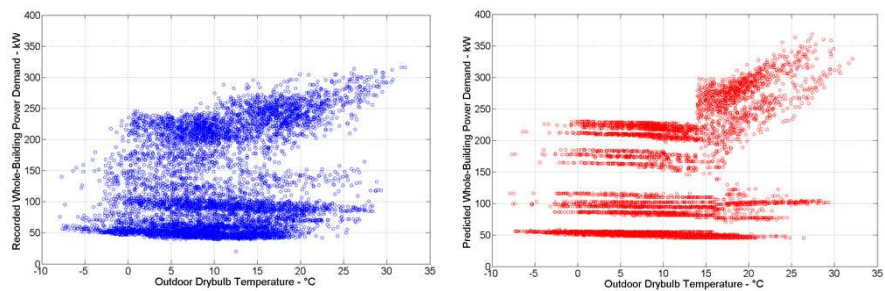
Case Study – Level 4 results

Recorded VS predicted WBE demand



Case Study – Level 4 results

Recorded (left) VS predicted (right) WBE demand



Conclusions

- Un modèle de calcul donne toujours une réponse
- La **calibration** d'un modèle est une étape cruciale qui conditionne son exploitation
- La difficulté principale réside dans la récolte et l'obtention des **données**
 - Du bâtiment et du système
 - Des consommations réelles, en particulier électriques
 - Des conditions de confort **effectivement** maintenues dans le bâtiment (et dans quelles zones)
- L'enrichissement des données améliore la capacité de **prédiction** du modèle (-> analyse coût/bénéfice nécessaire)

Merci de votre attention

<http://www.bems.ulg.ac.be>

