

# Fiabilité et analyse d'incertitudes en simulation énergétique et en ACV des bâtiments

Bruno PEUPORTIER et Marie-Lise Pannier  
MINES ParisTech, Centre Efficacité énergétique des Systèmes

## SOMMAIRE

**Contexte et objectifs**

**Simulation énergétique, validation**

**Analyses de sensibilité et incertitudes**

**Application à l'analyse de cycle de vie**

**Conclusions et perspectives**

### Simulation énergétique

Transition énergétique, protection du climat -> BBC, BEPOS

Financement, problématique de la garantie de performance énergétique

-> modèles fiables (validation)

-> évaluer les risques liés aux incertitudes sur les entrées (comportements, climat...)

### Analyse de cycle de vie

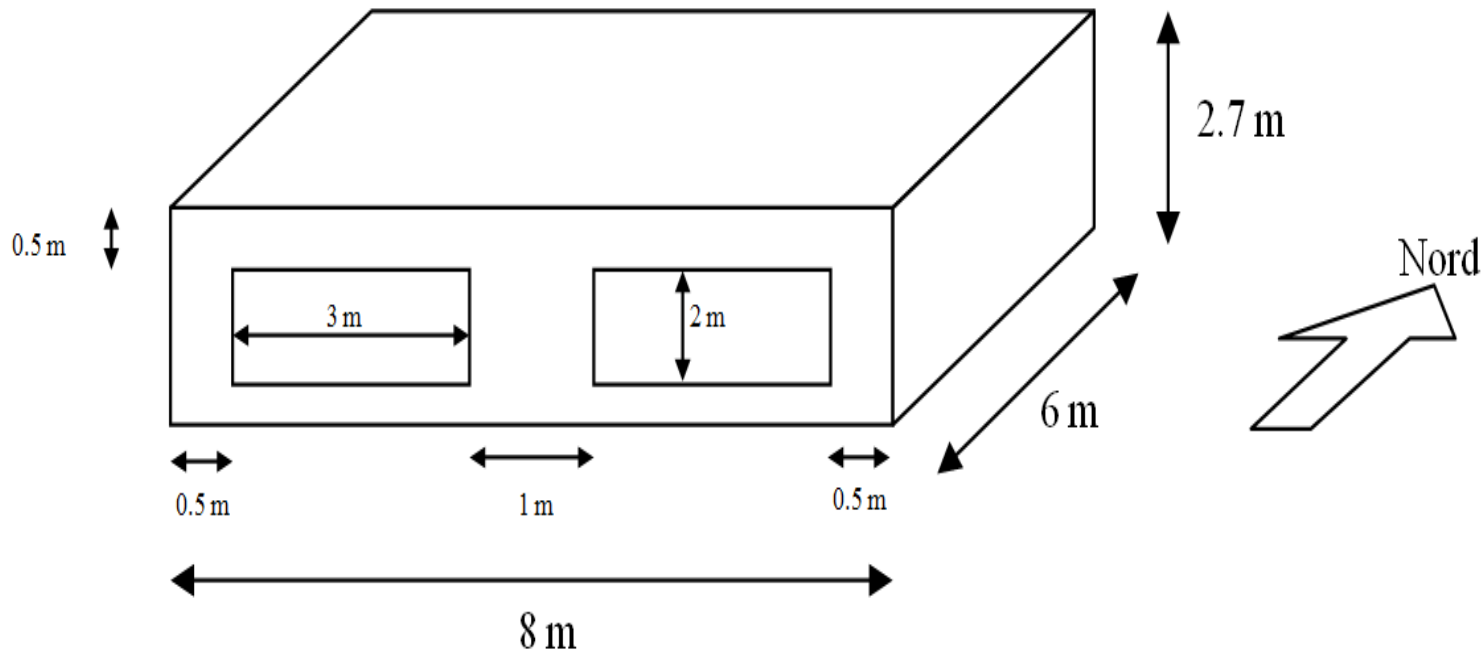
-> Fiabilité des modèles, bases de données, incertitudes

**Comparaison à des mesures (cellules test, bâtiments expérimentaux)**

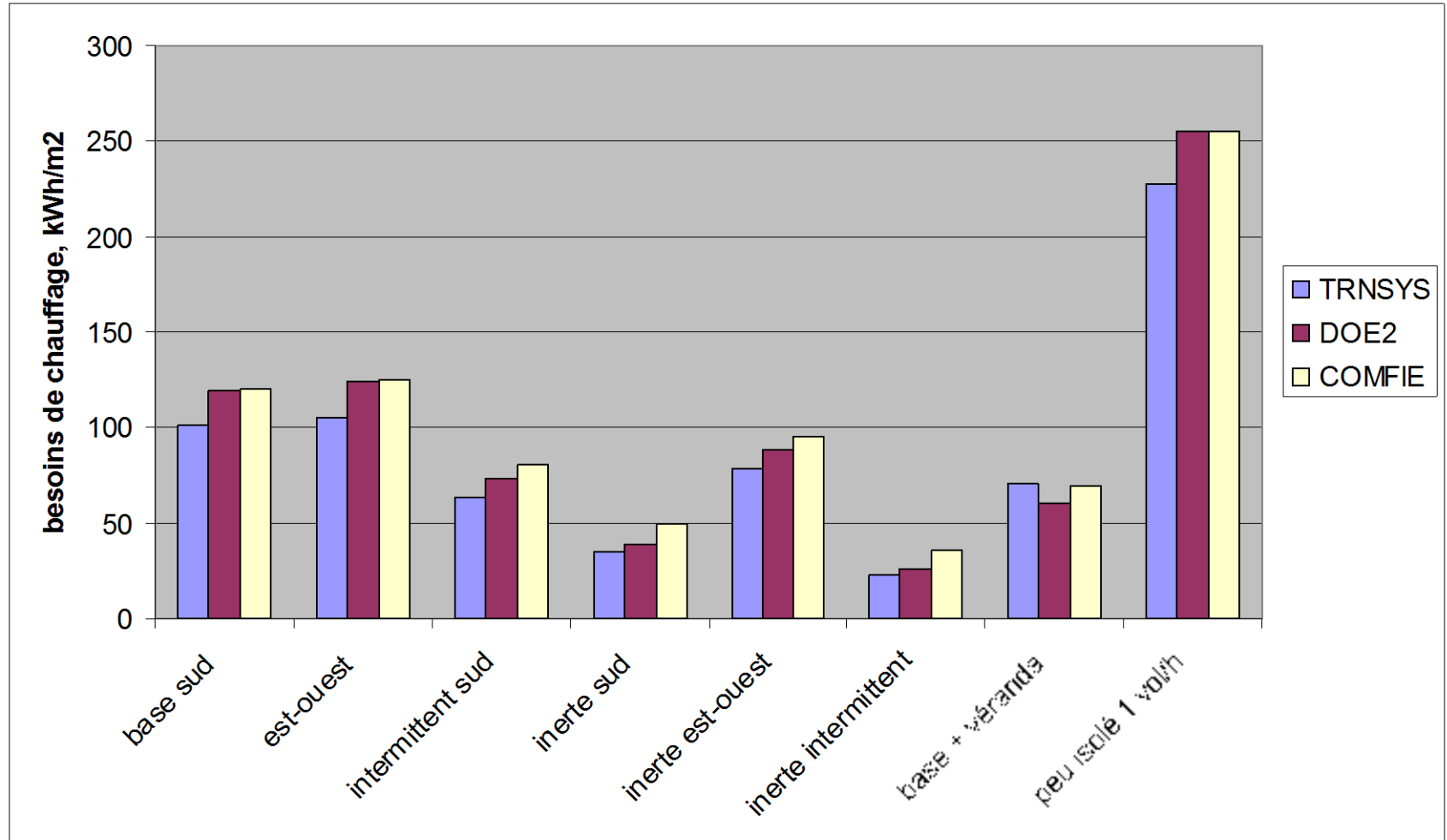
**Bâtiments occupés (maisons, immeuble HLM, école), incertitudes liées aux comportements**

**Cellules test PASSYS : Stuttgart et Cadarache**

**Bancs d'essais de logiciels (AICVF, Agence internationale de l'Energie)**

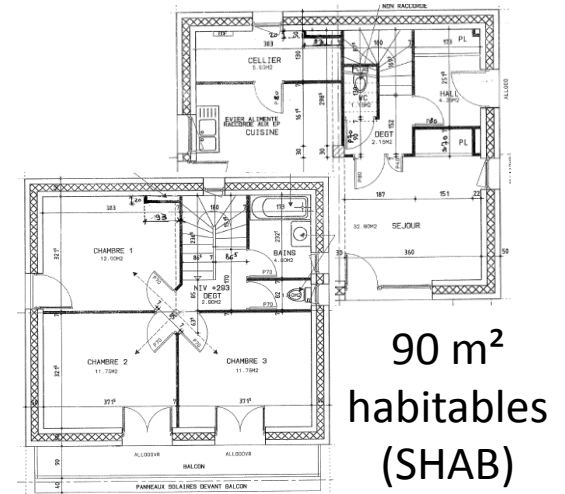


*36 cas : orientation, inertie, consigne, ventilation, protection solaire, propriétés optiques, bizona (véranda)*



*20% d'écart entre DOE et TRNSYS, COMFIE un peu plus élevé*

- Maisons de la plate forme INCAS
  - À l'INES au Bourget du Lac (Chambéry)
  - Maisons expérimentales performantes (similaire à Passivhaus)
  - Plusieurs variantes constructives

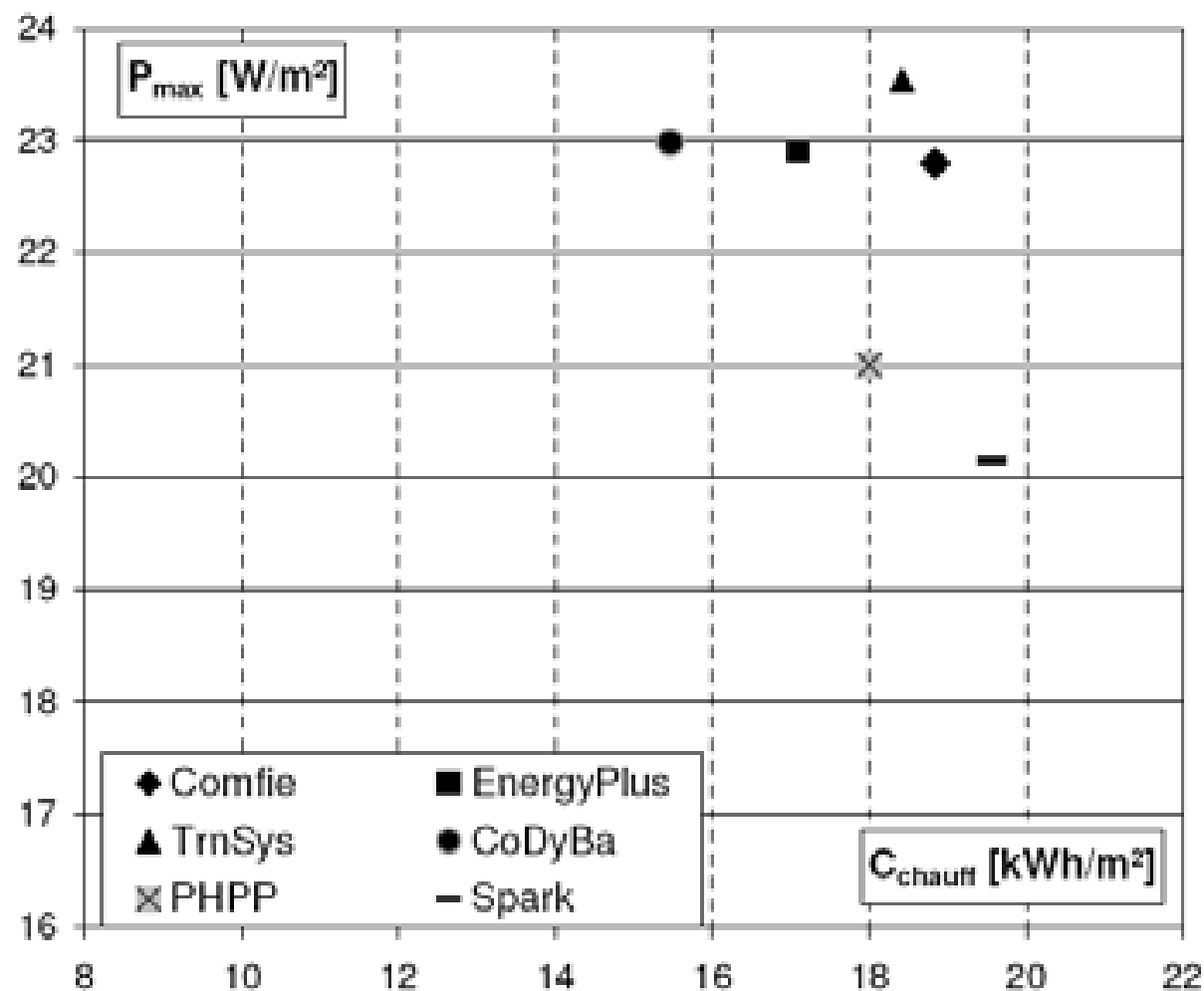


Béton banché I-BB

Double mur I-DM  
parpaings

Ossature bois I-OB

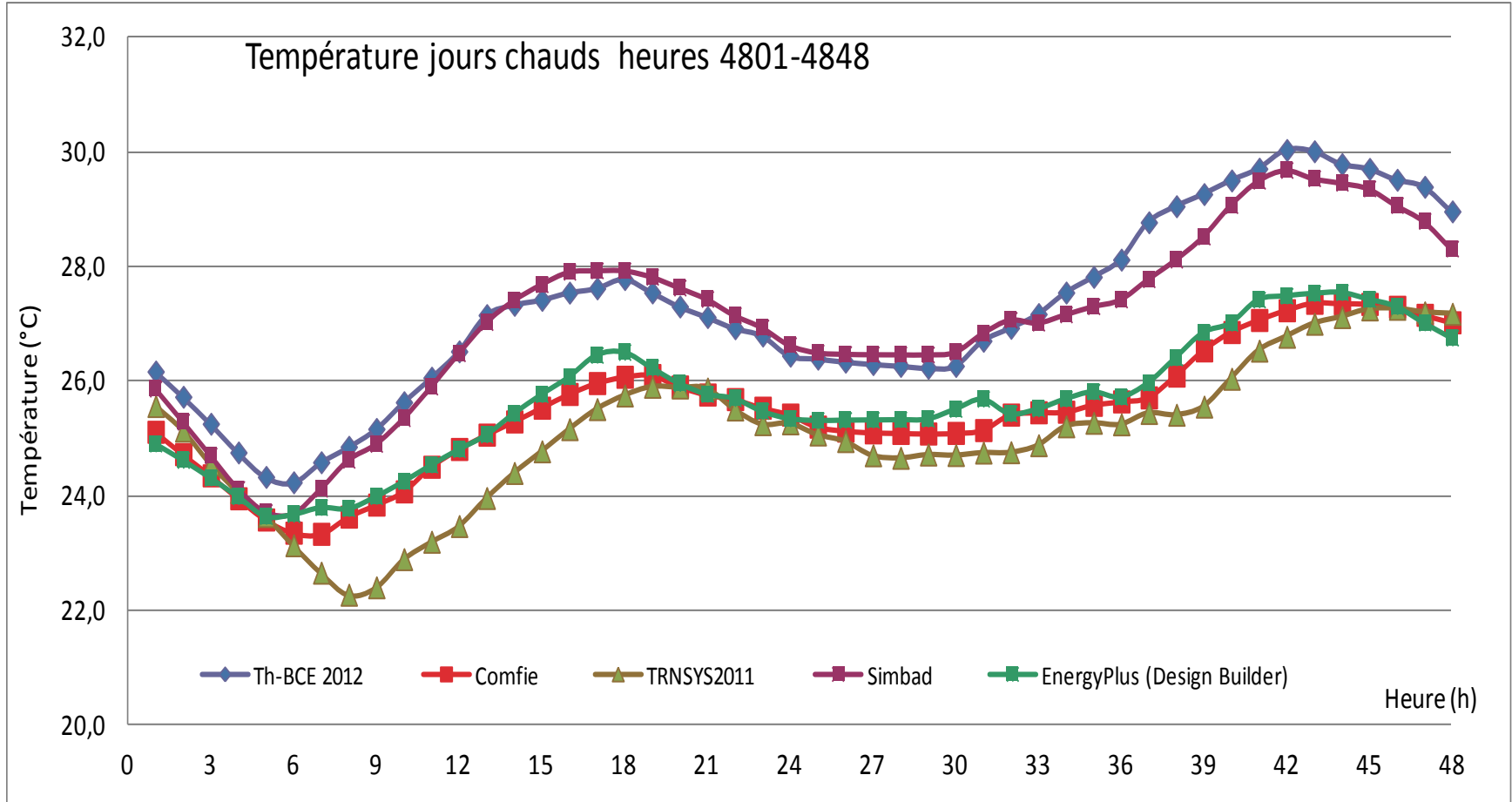
# Comparaison sur les performances d'hiver Maison double mur (A. Brun, INES)



Comparaison sur les besoins de chauffage et les puissances maximales

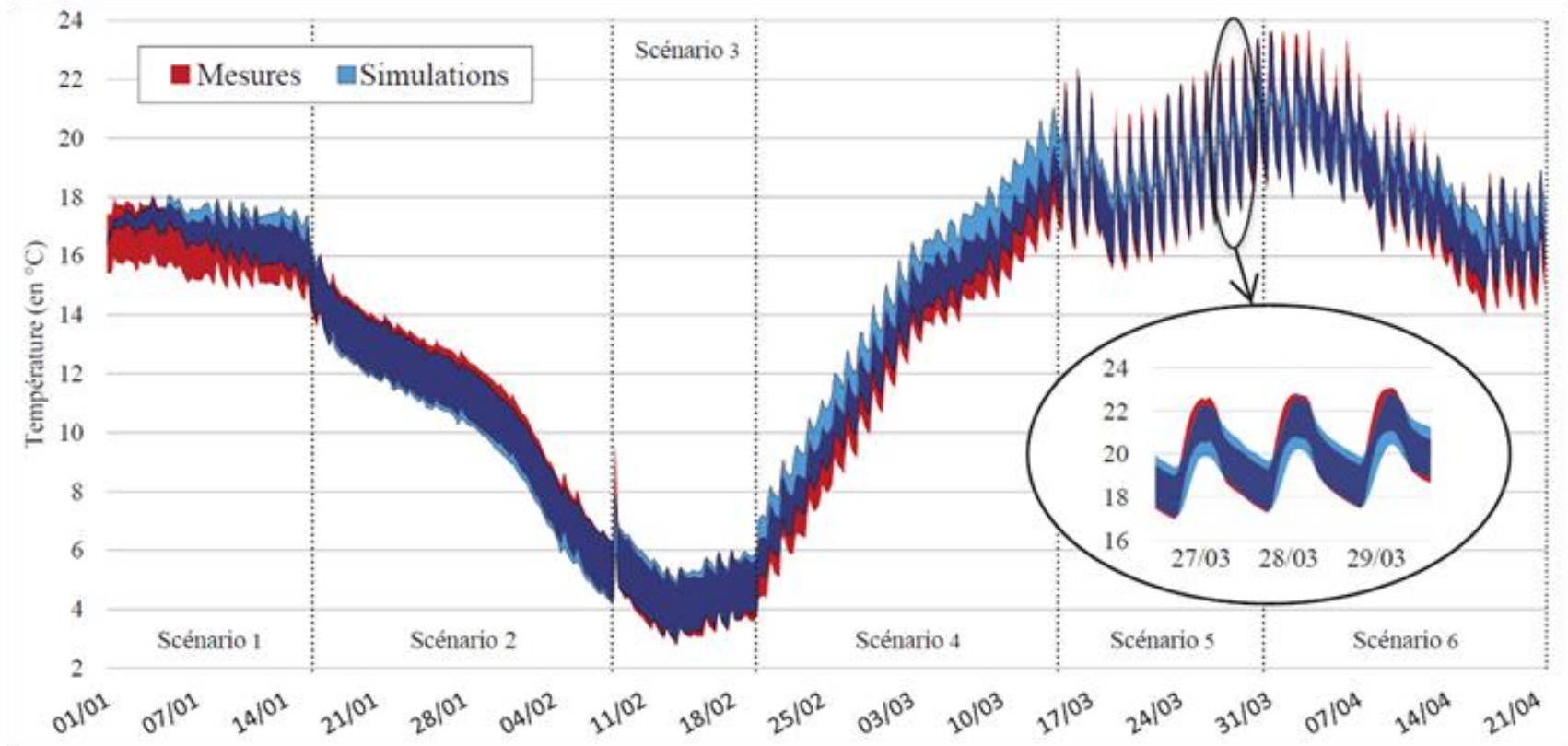


## Profils de température en été (rez-de-chaussée)



Comfie et EnergyPlus sont très proches

# Comparaison simulation-mesures avec incertitudes Maison béton banché, projet ANR Fiabilité



Cas d'application : maison INCAS, différents scénarios de fonctionnement (chauffage, ventilation, volets...)

EQM similaire à la référence internationale EnergyPlus



Figure 1a Outdoor test facility with removable façade element.

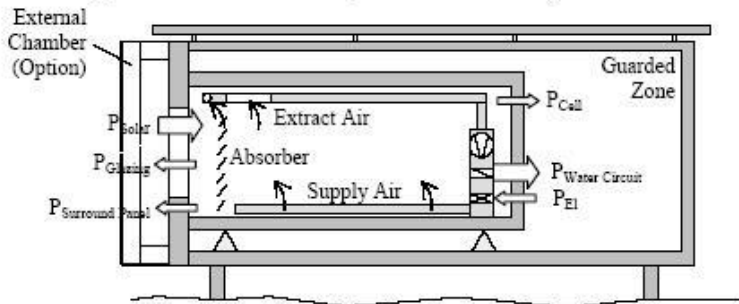
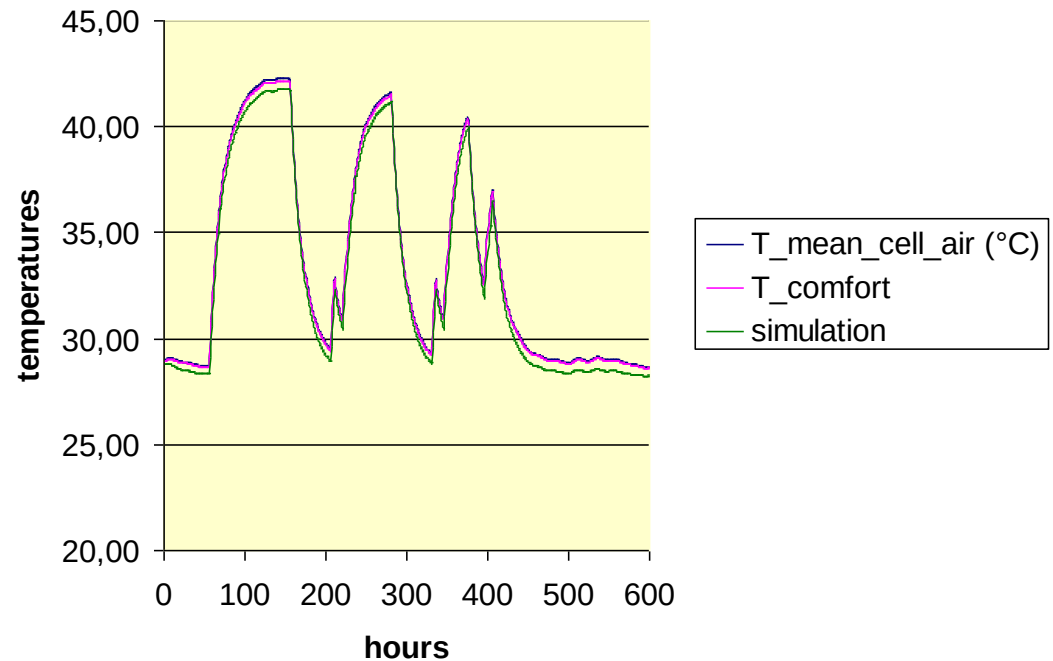
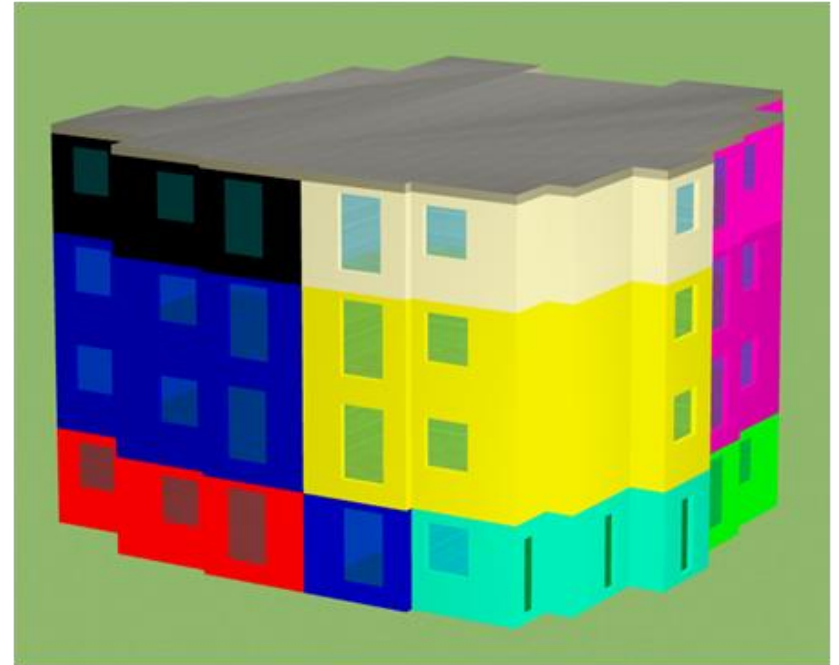
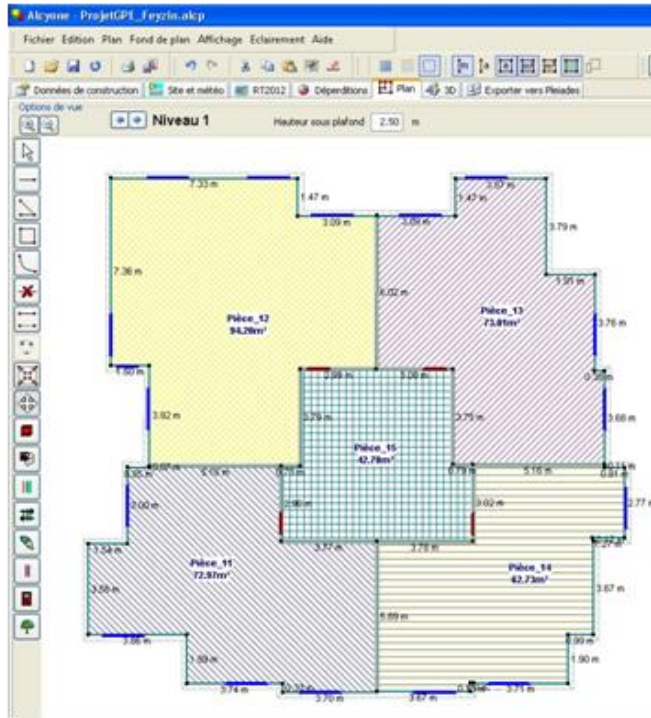


Figure 1b Diagram of test toom with an optional external chamber.



Explication des écarts : pont thermique ?

## Immeuble de 16 logements à Feyzin (69)



Zones thermiques (RdC, étages courants, dernier niveau / orientations)  
Géométrie, caractéristiques techniques avant et après travaux

**Données sur le site et le climat : température, rayonnement solaire, albédo, température eau froide**

**Géométrie (dimensions)**

**Matériaux de construction (conductivité et épaisseur des isolants, inertie, propriétés optiques), Ponts thermiques**

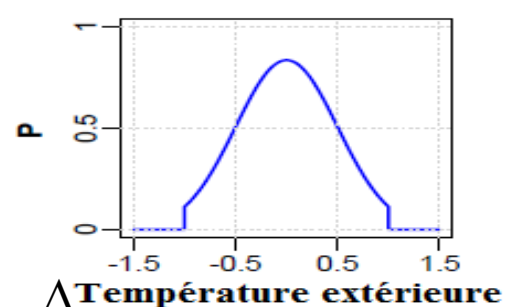
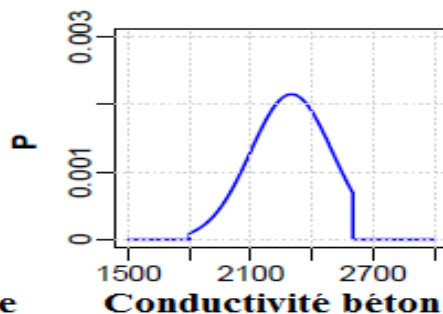
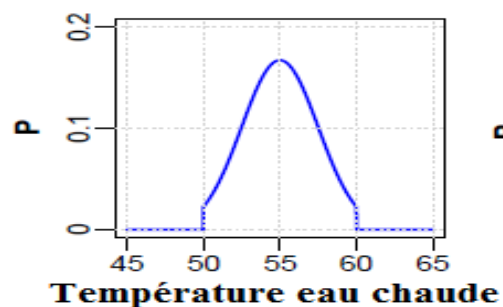
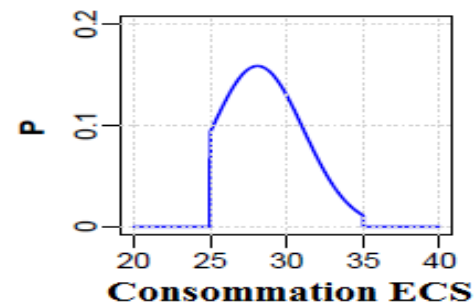
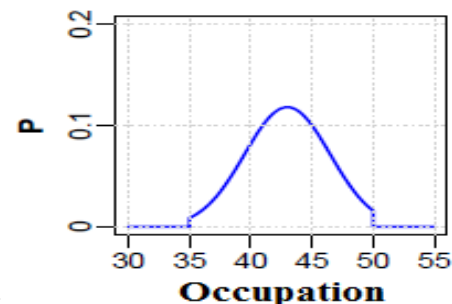
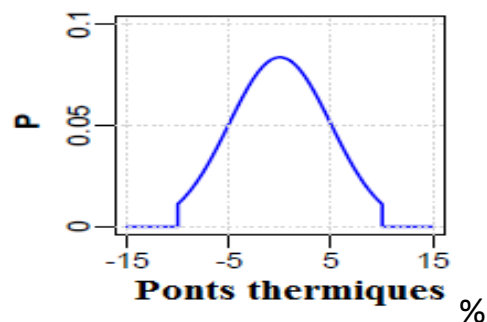
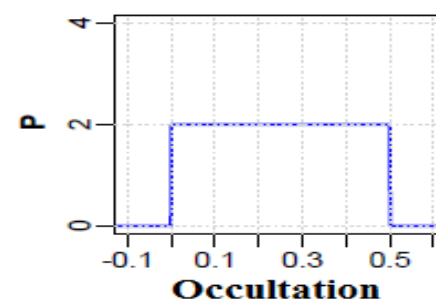
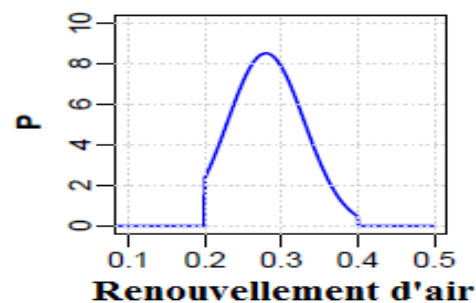
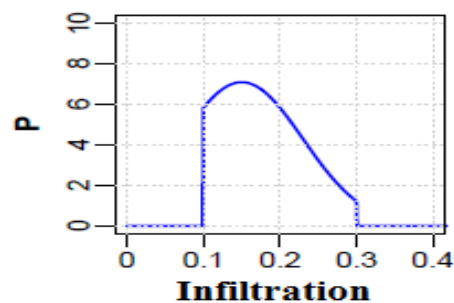
**Menuiseries (U, facteurs solaires, occultations)**

**Débits de ventilation et infiltrations**

**Rendement de la chaudière, régulation, distribution**

**Occupation (nb personnes, consommation électricité et ECS)**

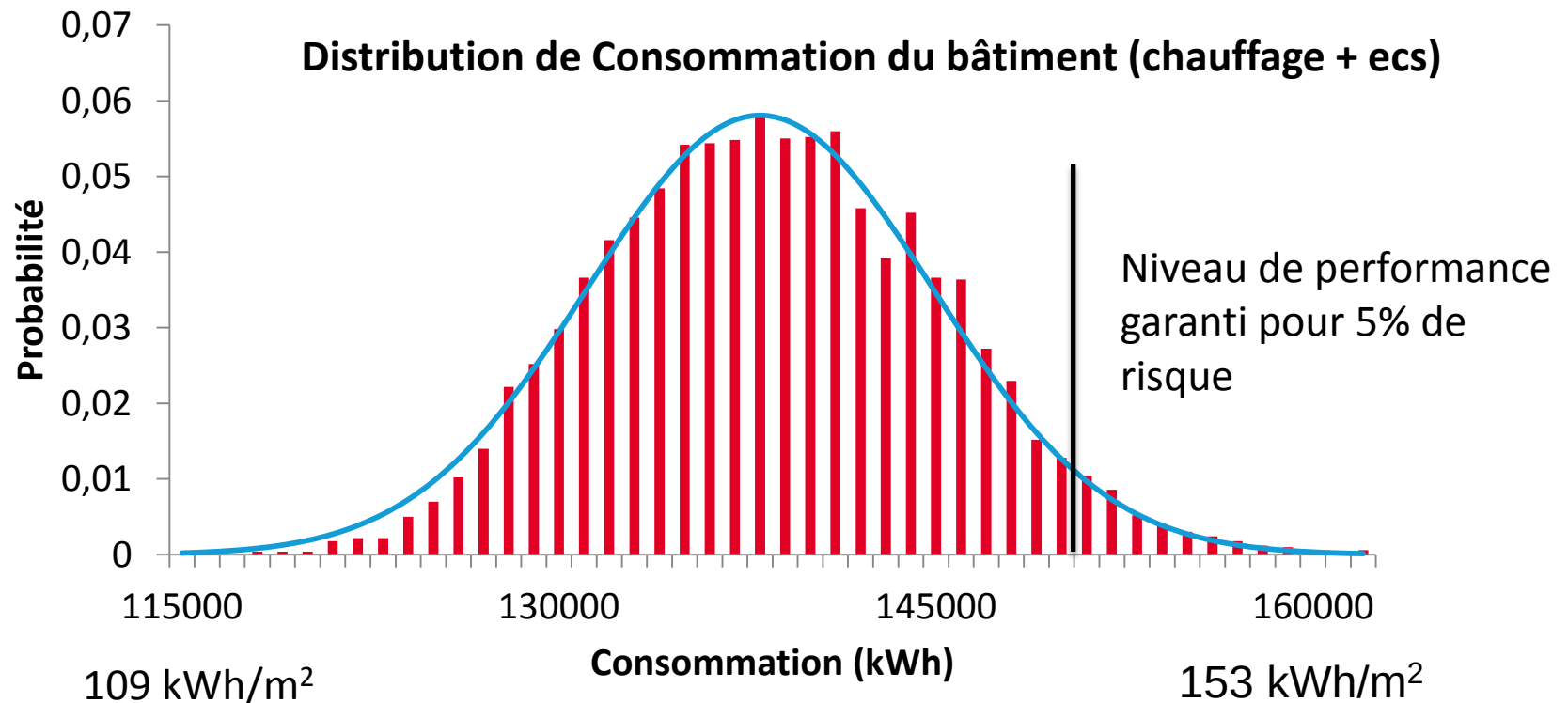
**Modélisation (zones, échanges convectifs, pas de temps)**



Approche par une loi normale

Moyenne  $\mu = 132 \text{ kWh/m}^2$ , Ecart Type  $\sigma = 7 \text{ kWh/m}^2$

5% de risque  $\rightarrow$  95 % de consommations inférieures, soit  $\mu + 1.645\sigma \rightarrow 142,5 \text{ kWh/m}^2$



## Sources d'incertitude

- Hypothèses, scénarios de comportement (eau, déchets...), durées de vie (bâtiment, composants)
- Evolutions sur le long terme (ex. production d'électricité)
- Modélisation, exemple : recyclage (stocks ou impacts évités)
- Inventaires de cycle de vie (bases de données)
- Impacts environnementaux (indicateurs, santé et biodiversité)



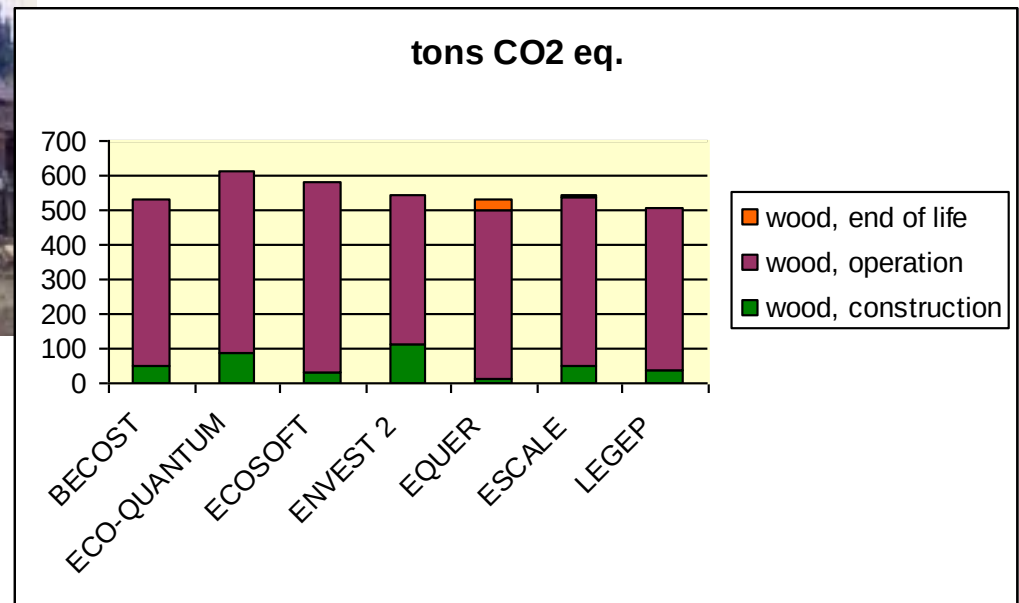
## Bases INIES (produits de construction) et PEP (équipements)

- Nombreuses données spécifiques (> 2000)
- Simplification des inventaires (168 flux), exemple : dioxines
- Hypothèses sur la fin de vie (ex. 75% de recyclage du béton)
- Données d'arrière plan pas toujours homogènes
- Produits français

## Base ecoinvent (bâtiment, transport, énergie, eau, déchets...)

- Données génériques (spécifiques aussi dans la version 3)
- Inventaires plus complets (> 1000 flux)
- Séparation des étapes (fabrication, transport, fin de vie...) EN 15804
- Calcul matriciel (interactions entre secteurs, homogène, actualisation)
- International, contextualisation

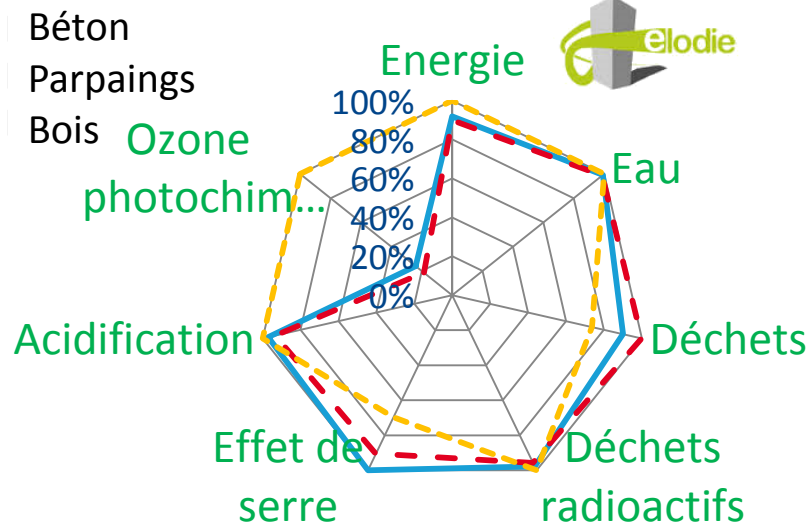
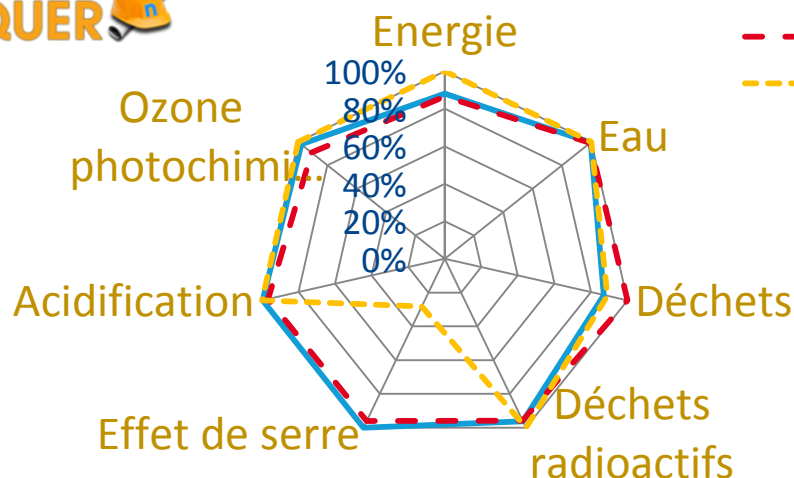
## Intérêt de fournir des données spécifiques dans ecoinvent



Maison suisse FUTURA, 210 m<sup>2</sup>, ossature bois,  
Chauffage gaz, 80 ans

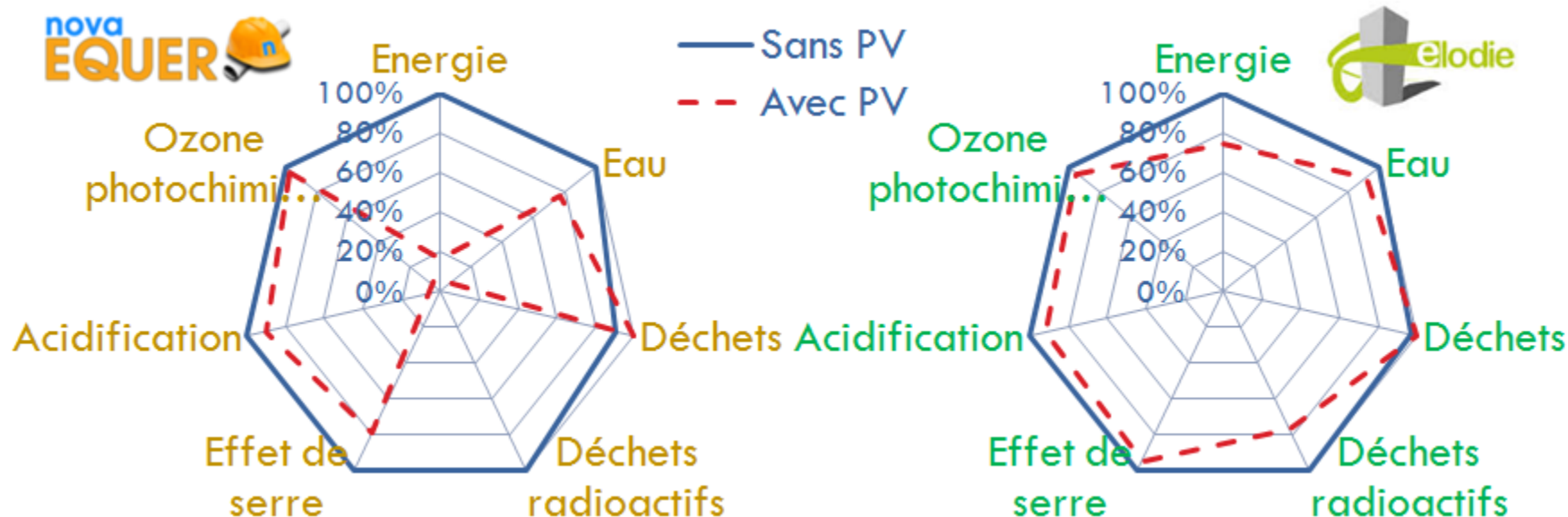
Écarts +/- 10% sur le cycle de vie

Cf. <http://www.etn-presco.net/>



| Similitudes                                                                                                                        | Différences                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie</li> <li>• Eau</li> <li>• Déchets radioactifs</li> <li>• Acidification</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet de serre (variante bois)</li> <li>• Formation d'ozone photochimique</li> </ul> |

- Causes des écarts : prise en compte du carbone biogénique (effet de serre) -> écart pour le bois, simplification des inventaires (ozone photochimique)



- Différences liées aux méthodologies des outils

- novaEQUER et les **impacts évités**

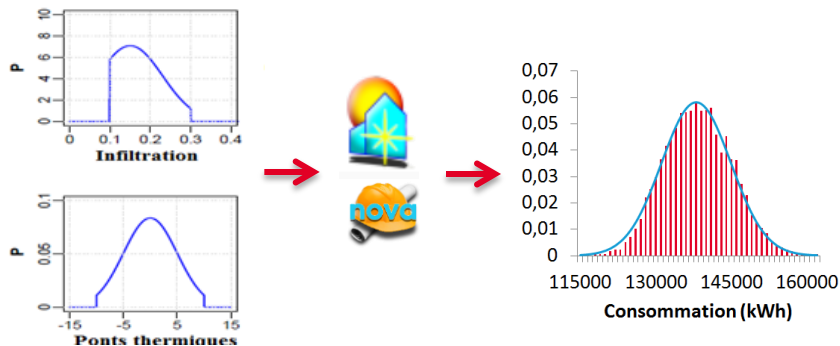
Électricité exportée = électricité non produite par le réseau

- Elodie et les **coproduits**

Électricité exportée = service supplémentaire rendu par le bâtiment

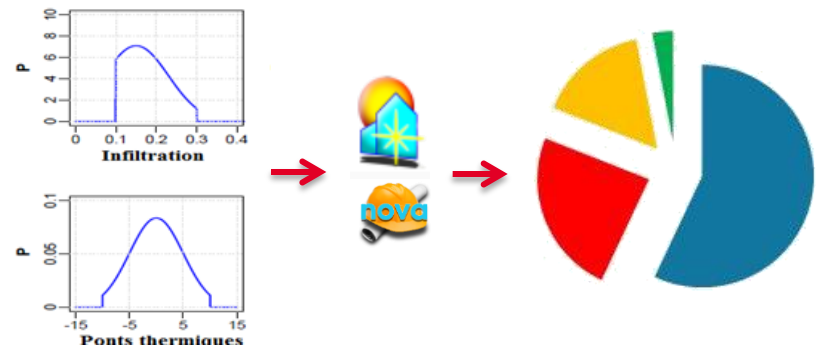
- Quel est le niveau d'incertitude en sortie résultant de l'incertitude sur les entrées ?

➔ Analyse d'incertitude (AI)

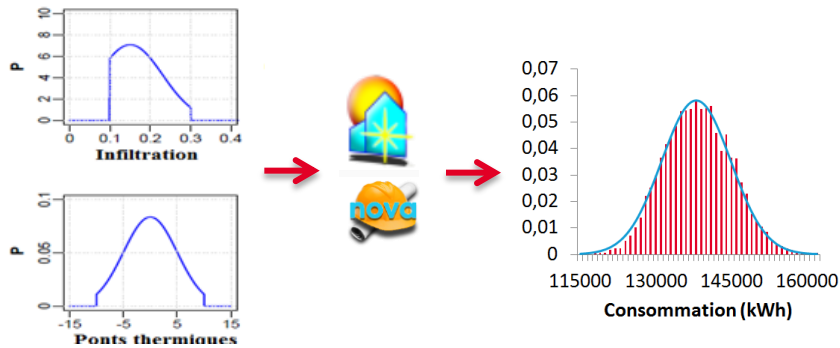


- Quelles entrées ont le plus d'influence sur les incertitudes en sortie ?

➔ Analyse de sensibilité (AS)

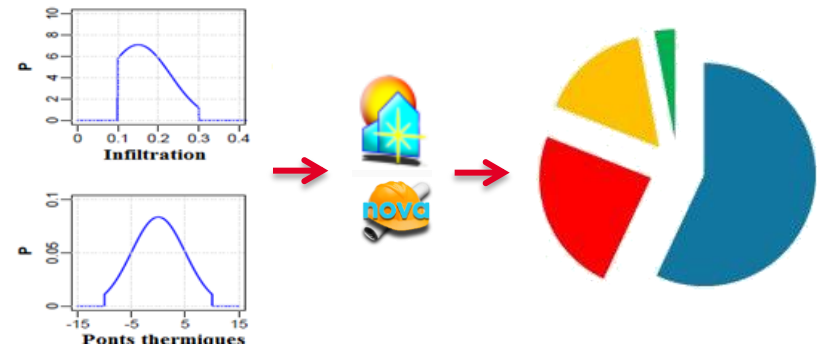


## → Analyse d'incertitude (AI)



Grand nombre de calcul pour assurer la convergence.

## → Analyse de sensibilité (AS)



Grand nombre de calcul pour assurer la convergence.

&

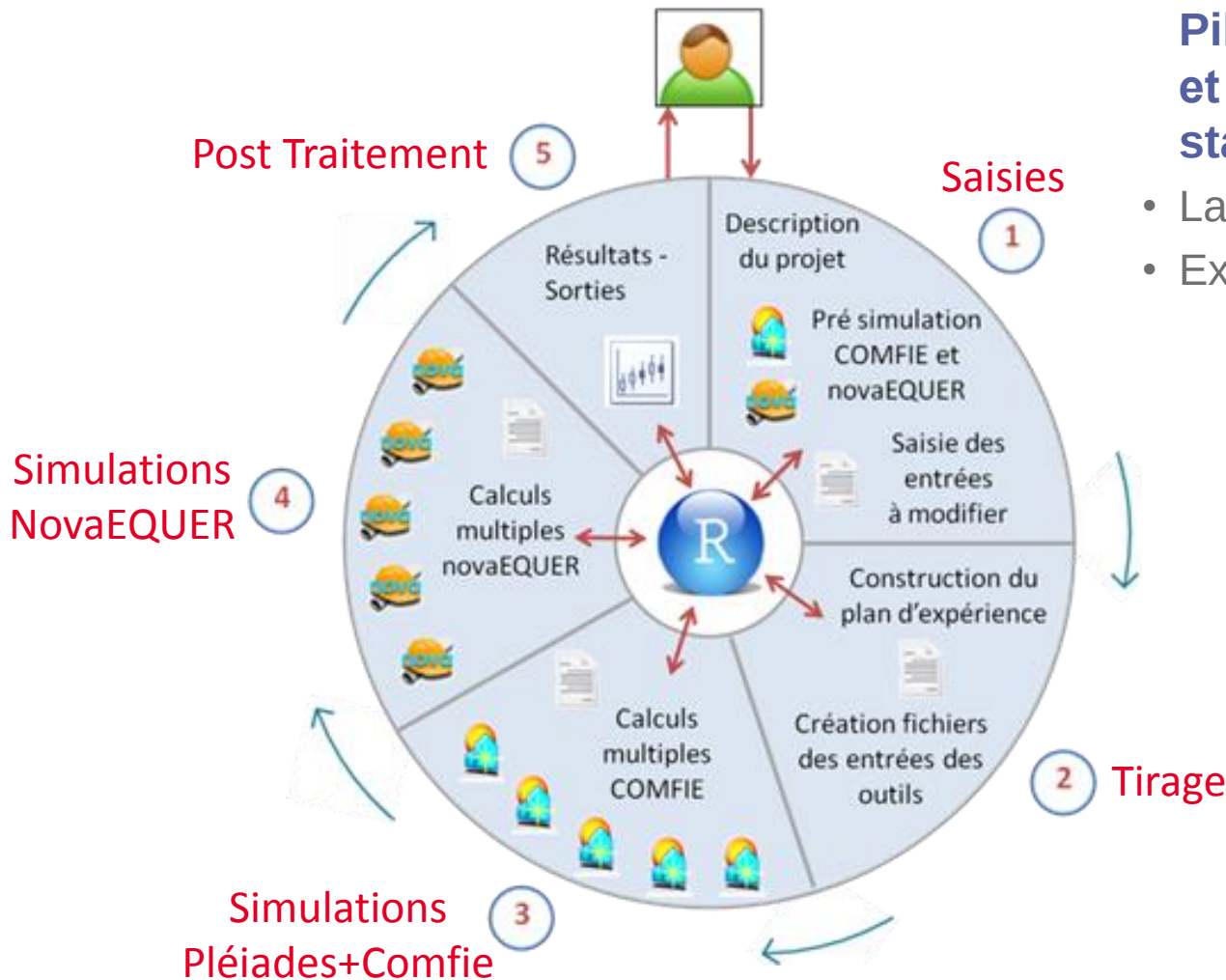
Nombre de calcul proportionnel au nombre d'entrée.

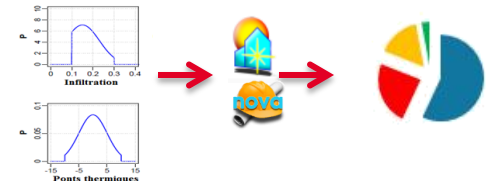
→ Nombres calculs

## Pilotage de Pleiades+Comfie et novaEQUER via l'outil statistique R

- Lancement de milliers de calculs
- Exploitation des résultats

➔ Coût de calcul en analyse de sensibilité





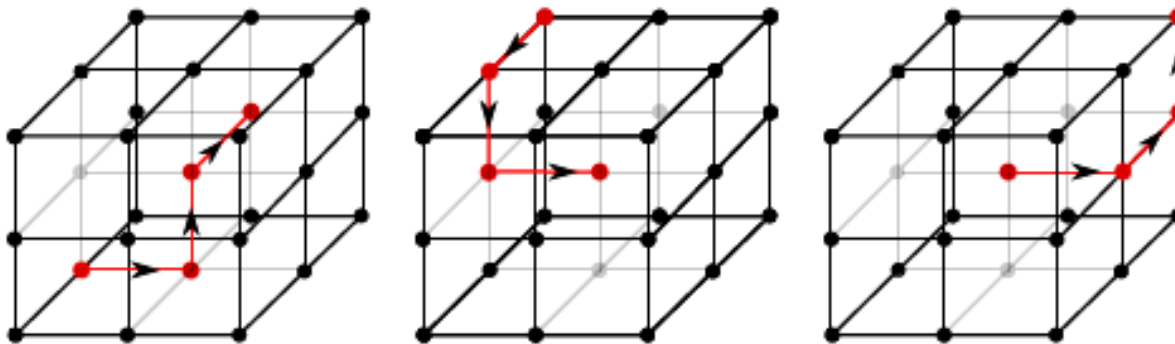
## Réduction du nombre d'entrée → Sélection des facteurs d'entrée les plus influents

- Criblage de Morris

Idée : Exploration de l'espace des entrées et classement des facteurs par ordre d'importance

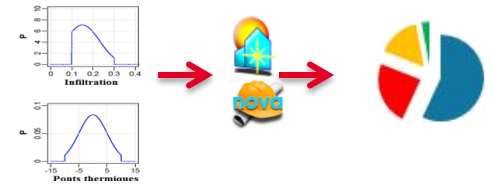
Discrétisation du domaine uniformément en niveau → **Grille**

Répétition de trajectoires dans l'espace → **une entrée modifié à la fois**



Exemple pour 3 facteurs  
d'entrée d'après  
Munaretto (2014 )





## Classification des entrées

- Effets négligeables
- Effets linéaires et sans interactions
- Effets non linéaires ou avec interactions

Observation des effets élémentaires pour chaque facteur :

$$EE_j^i = \frac{\mathcal{F}(x_1^i, \dots, x_j^i + \Delta x_j^i, \dots, x_d^i) - \mathcal{F}(x_1^i, \dots, x_j^i, \dots, x_d^i)}{\Delta}$$

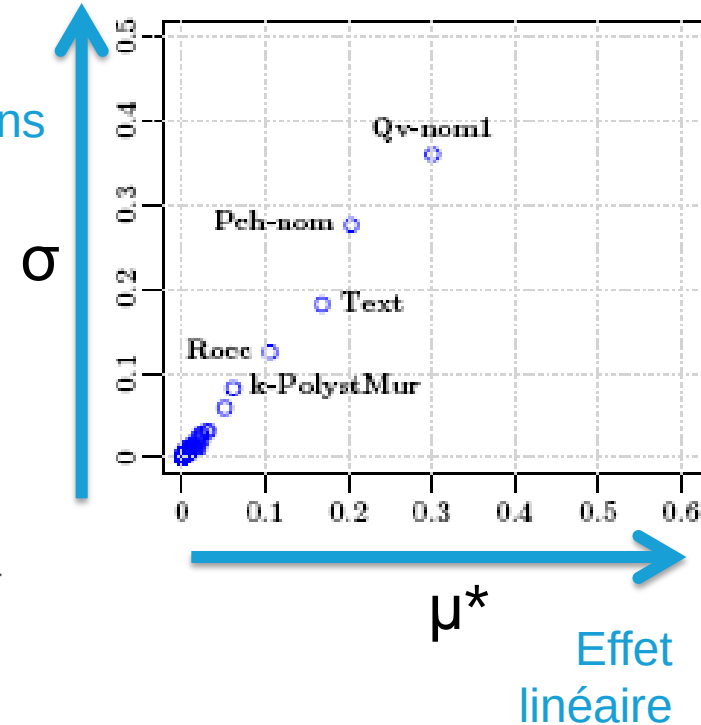
Plus la moyenne est grande, plus le facteur est important.

$$\mu_j^* = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r |EE_j^i|$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (EE_j^i - \mu_j^*)^2}$$

Si l'écart-type est grand, l'effet du facteur n'est pas le même quelque soit l'endroit de l'espace.

Effet non  
linéaire /  
interactions



# Exemple sur un cas d'étude

## Criblage de Morris pour la maison INCAS en béton

### - 20 facteurs d'entrée étudiés

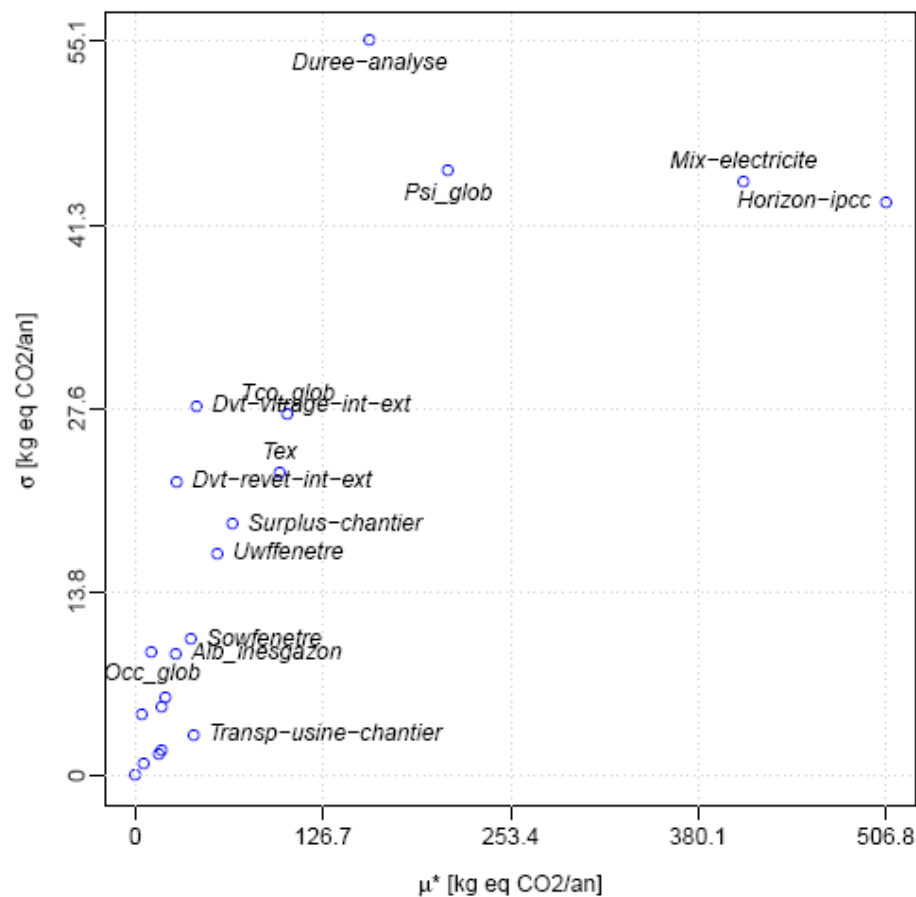
#### Facteurs calibrables – faible incertitude

|                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------|------------|
| Scénarios d'occupation, de ventilation, de puissance dissipée | +/- 10 %   |
| Consigne de température                                       | +/- 0,5 °C |
| Facteur solaire et U des fenêtres                             | +/- 5 %    |
| Epaisseur d'isolant et de béton                               | +/- 0,5 cm |
| Albédo                                                        | +/- 15 %   |
| Température extérieur                                         | +/- 0,5 °C |
| Rayonnement global horizontal                                 | +/- 10 %   |

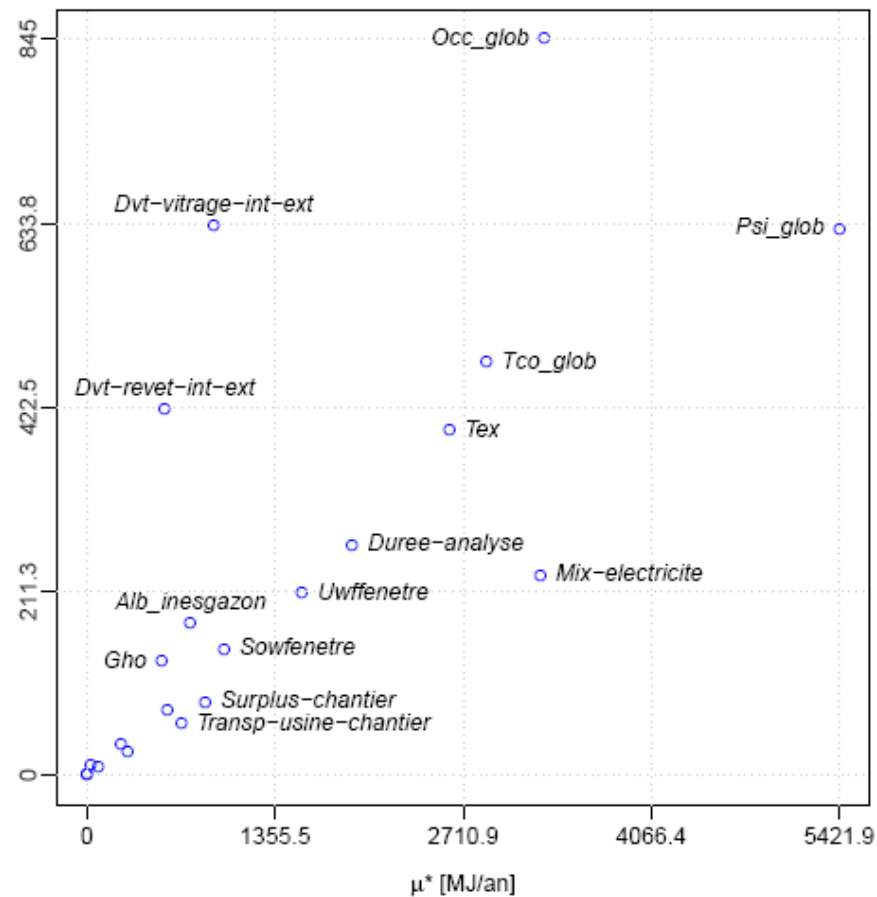
#### Facteurs non calibrables

|                              |                                        |
|------------------------------|----------------------------------------|
| Ponts thermiques             | +/- 50 %                               |
| Surplus de matériaux         | 0 à 10 % (FDES)                        |
| Durée de vie du bâtiment     | 70 à 90 ans                            |
| Durée de vie des fenêtres    | 15 à 60 ans (FDES)                     |
| Durée de vie des revêtements | 5 à 50 ans (FDES)                      |
| Rendement du réseau d'eau    | 70 à 90 %                              |
| Distance usine-site          | 10 à 100 ans (eco.)                    |
| Distance site-décharge       | 10 à 50 ans (eco.)                     |
| Mix électrique               | Fixe ou dynamique                      |
| Type de béton                | B35/25 CEM I 42,5 ou B60/50 CEM I 42,5 |
| Horizon temporel GWP         | 20 ou 500 ans                          |

EffetDeSerre



DemandeCumulativeEnergie



## - Classement des paramètres par ordre d'influence

|                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <u>Effet de serre</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Horizon temporel GWP</li> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Temp. extérieure</li> </ul> | <u>Énergie</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Occupation</li> <li>• Mix électrique</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Temp. extérieure</li> </ul>                | <u>Eau</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Occupation</li> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Durée analyse</li> </ul>                            | <u>Acidification</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Temp. extérieure</li> <li>• Durée analyse</li> </ul> |
| <u>Eutrophisation</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mix électrique</li> <li>• Occupation</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Temp. extérieure</li> </ul>           | <u>Ozone photochimique</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Temp. extérieure</li> <li>• Durée analyse</li> </ul> | <u>Santé humaine</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Durée analyse</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Temp. extérieure</li> </ul>            | <u>Biodiversité</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Durée revêtements</li> <li>• Durée analyse</li> <li>• Durée vitrage</li> </ul>     |
| <u>Déchets</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durée analyse</li> <li>• Surplus-chantier</li> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Epaisseur béton</li> </ul>                 | <u>Déchets radioactifs</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mix électrique</li> <li>• Occupation</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Temp. extérieure</li> </ul>    | <u>Épuisement des ressources</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Temp. de consigne</li> <li>• Temp. Extérieur</li> <li>• Durée analyse</li> </ul> | <u>Odeur</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transp. usine-site</li> <li>• Mix électrique</li> <li>• Ponts thermiques</li> <li>• Durée analyse</li> <li>• Transp. site-décharge</li> </ul>   |

- **Facteurs de conception du bâti et liés au site**
- Observer l'influence d'autres facteurs (déchets et transports des usagers, méthodologie, inventaire des bases de données)
- Sélectionner les facteurs les plus influents
- Mener des analyses de sensibilité et d'incertitudes
- Étudier la robustesse des résultats face à ces incertitudes : en comparant des variantes

## Conclusions

- Nombreuses études sur la fiabilité de la simulation énergétique concernant l'enveloppe des bâtiments
- Etudes en cours concernant les systèmes
- Méthodologie applicable à l'analyse de cycle de vie
- Identification des paramètres les plus influents

## Perspectives

- Quantification des incertitudes
- Intérêt d'améliorer les bases de données existantes
- Veille sur de nouveaux indicateurs environnementaux concernant la santé et la biodiversité

**Merci de votre attention**