

# De l'expérimentation à la modélisation des propriétés hygrothermiques de parois isolées en paille

LOUIS Arnaud  
Université de Liège, Belgique

# Introduction

- Marché en plein essor mais pénalisé par les préjugés et le manque de connaissance.



Maison Feuillette en construction (*Science et Vie* n°56, 1921) (site des Compailions)



Maison Feuillette en 2011 (Photo JB THEVARD, Compailions)

# Introduction

- Marché en plein essor mais pénalisé par les préjugés et le manque de connaissance.
- En France:
  - 1000 à 3000 bâtiments en paille
  - Organisation de la filiale: Compailleurs, règles professionnelles de la construction en paille,...



Maison Feuillette en construction (*Science et Vie* n°56, 1921) (site des Compailleurs)



Maison Feuillette en 2011 (Photo JB THEVARD, Compailleurs)

# Introduction

- Marché en plein essor mais pénalisé par les préjugés et le manque de connaissance.
- En France:
  - 1000 à 3000 bâtiments en paille
  - Organisation de la filiale: Compailleurs, règles professionnelles de la construction en paille,...
- En Belgique
  - Premier pas: 100 à 150 bâtiments
  - Projet régional aPROpaille



Maison Feuillette en construction (*Science et Vie* n°56, 1921) (site des Compailleurs)



Maison Feuillette en 2011 (Photo JB THEVARD, Compailleurs)

# Projet aPROpaille

# Projet aPROpaille

- Objectif de la recherche:

« Améliorer la connaissance sur le comportement et les performances de parois dont la performance thermique est essentiellement obtenue par usage de la paille. »

# Projet aPROpaille

- Objectif de la recherche:

« Améliorer la connaissance sur le comportement et les performances de parois dont la performance thermique est essentiellement obtenue par usage de la paille. »

- Partenaires:

- Université de Liège
- Université Catholique de Louvain
- Institut de Conseil et d'Etude en Développement Durable
- Paille-Tech

# Projet aPROpaille

- Objectif de la recherche:

« Améliorer la connaissance sur le comportement et les performances de parois dont la performance thermique est essentiellement obtenue par usage de la paille. »

- Partenaires:

- Université de Liège
- Université Catholique de Louvain
- Institut de Conseil et d'Etude en Développement Durable
- Paille-Tech

- Financement :

- Service public de Wallonie (DGO4 et DGO6)



# Organisation du projet

---

# Organisation du projet

---

Sélection et détermination des propriétés  
hygrothermiques des matières premières



# Organisation du projet

---

Sélection et détermination des propriétés  
hygrothermiques des matières premières

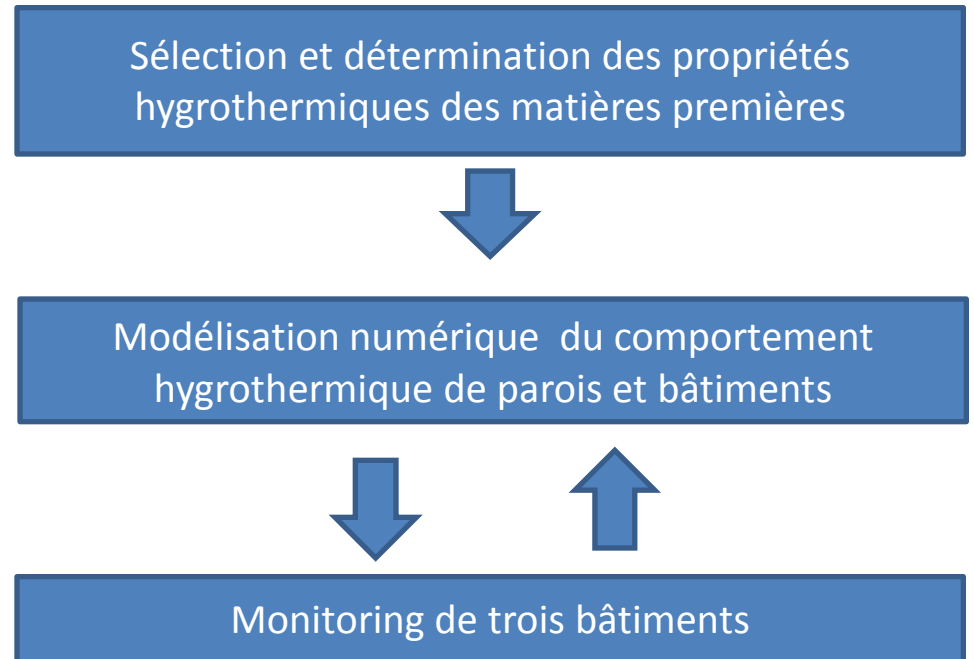


Modélisation numérique du comportement  
hygrothermique de parois et bâtiments



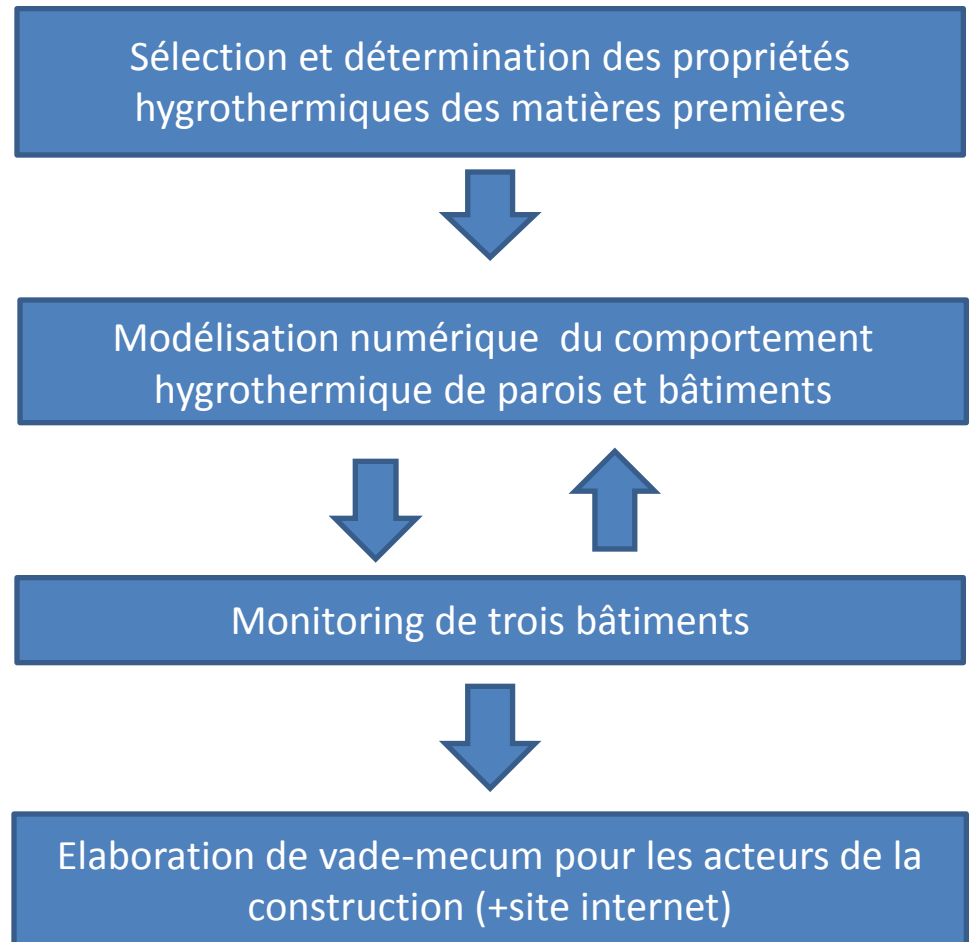
# Organisation du projet

---



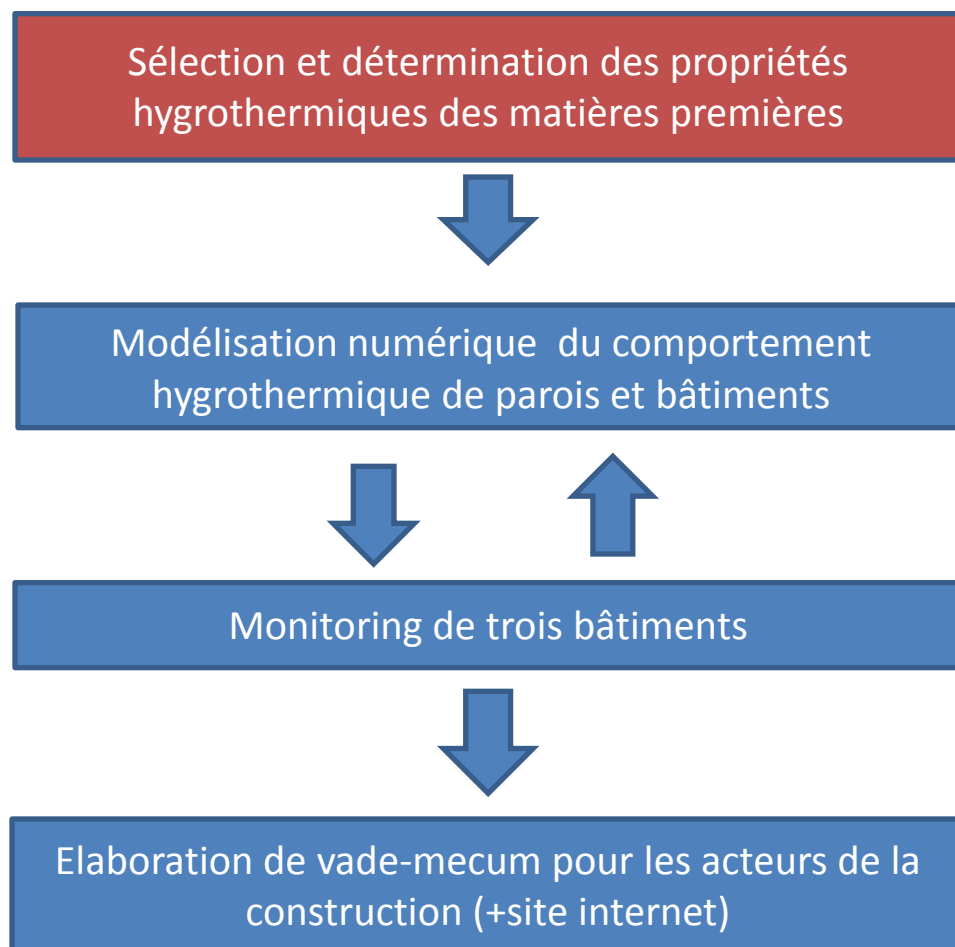
# Organisation du projet

---



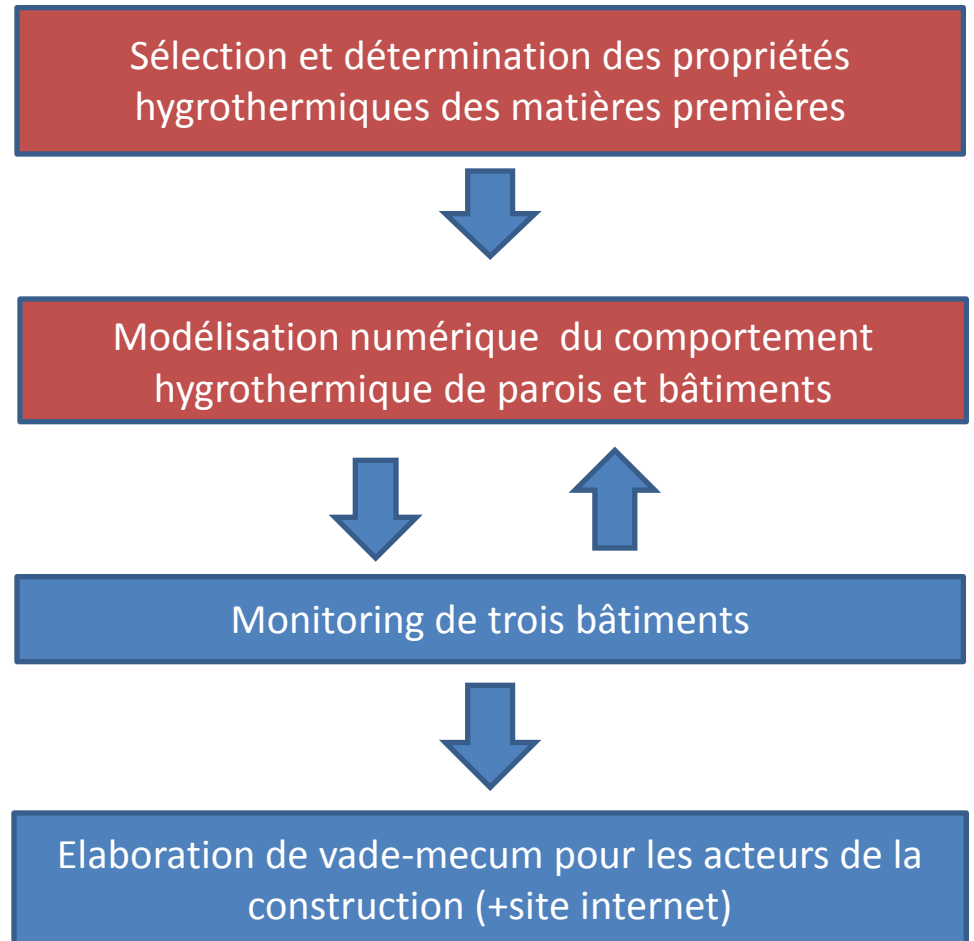
# Organisation du projet

---



# Organisation du projet

---



# Organisation du projet



Sable, paille et  
argile wallonne  
→ enduit  
manufacturé

Sélection et détermination des propriétés  
hygrothermiques des matières premières



Modélisation numérique du comportement  
hygrothermique de parois et bâtiments



Monitoring de trois bâtiments



Elaboration de vade-mecum pour les acteurs de la  
construction (+site internet)

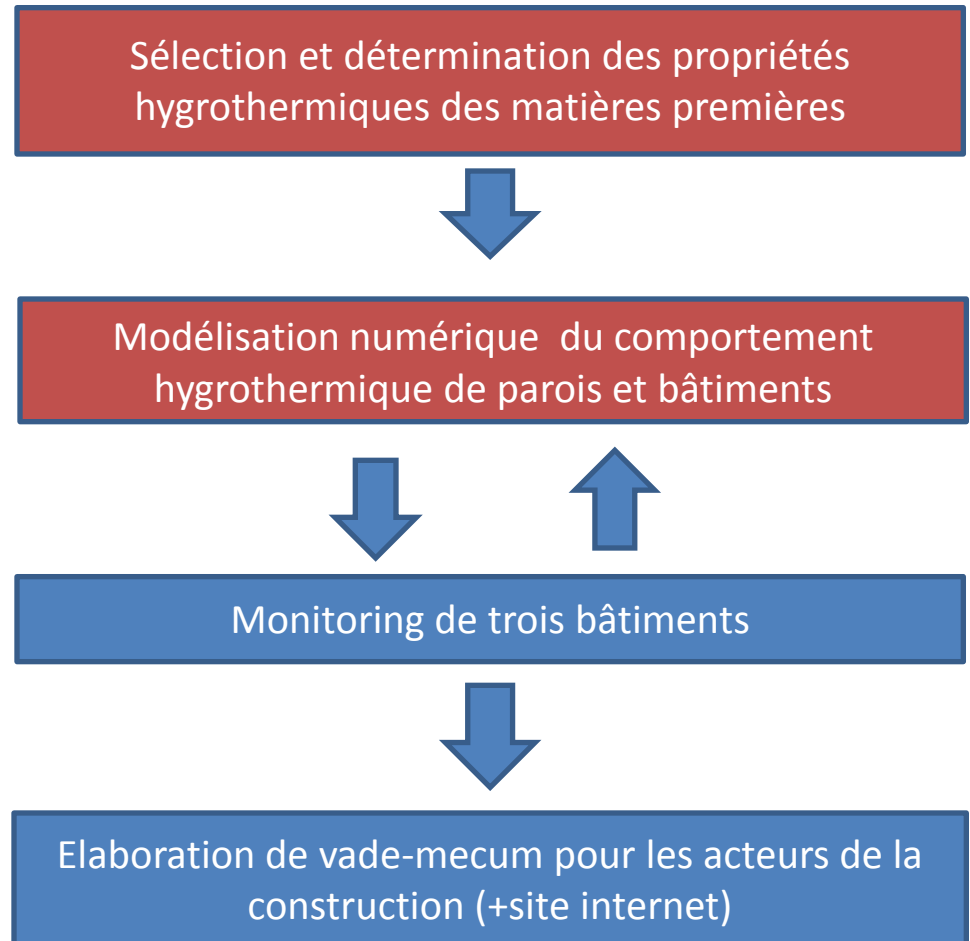


# Organisation du projet



Sable, paille et argile wallonne  
→ enduit manufacturé

Granulat 4/8 et mélange de sable + argile en sac → enduit industriel



# Organisation du projet

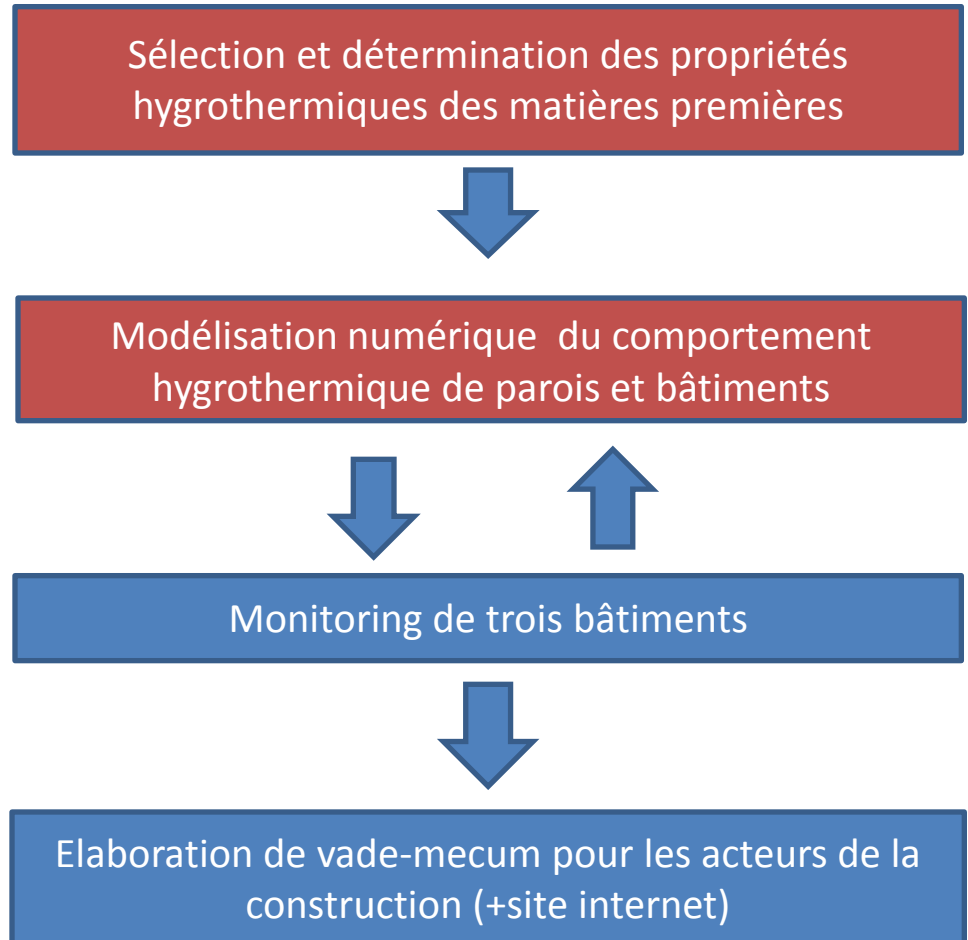


Sable, paille et argile wallonne  
→ enduit manufacturé

Granulat 4/8 et mélange de sable + argile en sac → enduit industriel



Ballot froment  
(36X46X80) cm<sup>3</sup>



# Propriétés générales

---

# Propriétés générales

---

- Enduit

# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX

# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX

Argile enduit manufacturé	20% d'argile gonflante dans la fraction <63 $\mu$ m
Argile enduit industriel	10% d'argile gonflante dans la fraction <63 $\mu$ m

# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX

# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX
  - Caractérisation Physique



# Propriétés générales

---

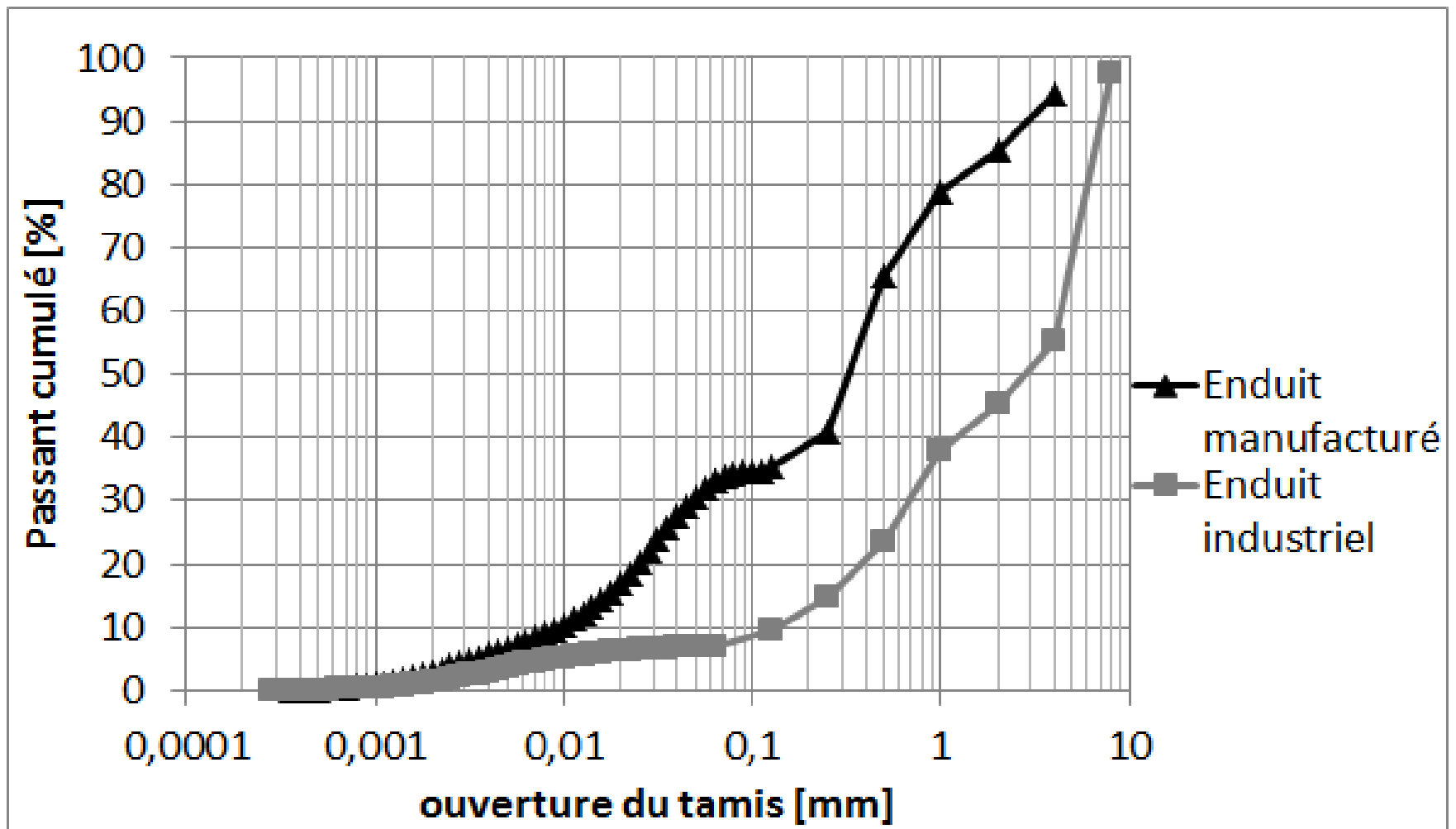
- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX
  - Caractérisation Physique
    - Analyse au bleu de méthylène

# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX
  - Caractérisation Physique
    - Analyse au bleu de méthylène
    - Granulométrie (voie sèche, humide et laser)

# Propriétés générales



# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX
  - Caractérisation Physique
    - Analyse au bleu de méthylène
    - Granulométrie (voie sèche, humide et laser)

# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX
  - Caractérisation Physique
    - Analyse au bleu de méthylène
    - Granulométrie (voie sèche, humide et laser)
    - Demande en eau
    - Limite d'Atterberg

# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX
  - Caractérisation Physique
    - Analyse au bleu de méthylène
    - Granulométrie (voie sèche, humide et laser)
    - Demande en eau
    - Limite d'Atterberg
- Paille

# Propriétés générales

---

- Enduit
  - Caractérisation chimique
    - DRX
  - Caractérisation Physique
    - Analyse au bleu de méthylène
    - Granulométrie (voie sèche, humide et laser)
    - Demande en eau
    - Limite d'Atterberg
- Paille
  - Variété
  - Teneur en eau à la réception [ $<20\%$ ]

# Propriétés hygrométriques (protocole)

---



# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

- Sur les deu  
– Mesure d



# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)

<b>Echantillons</b>	<b>Pycnométrie à l'azote [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Masse volumique apparente [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Porosité déduite</b>
<b>Enduit manufacturé</b>	2662	1752	34,2%
<b>Enduit industriel</b>	2728	2051	24,8%

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)

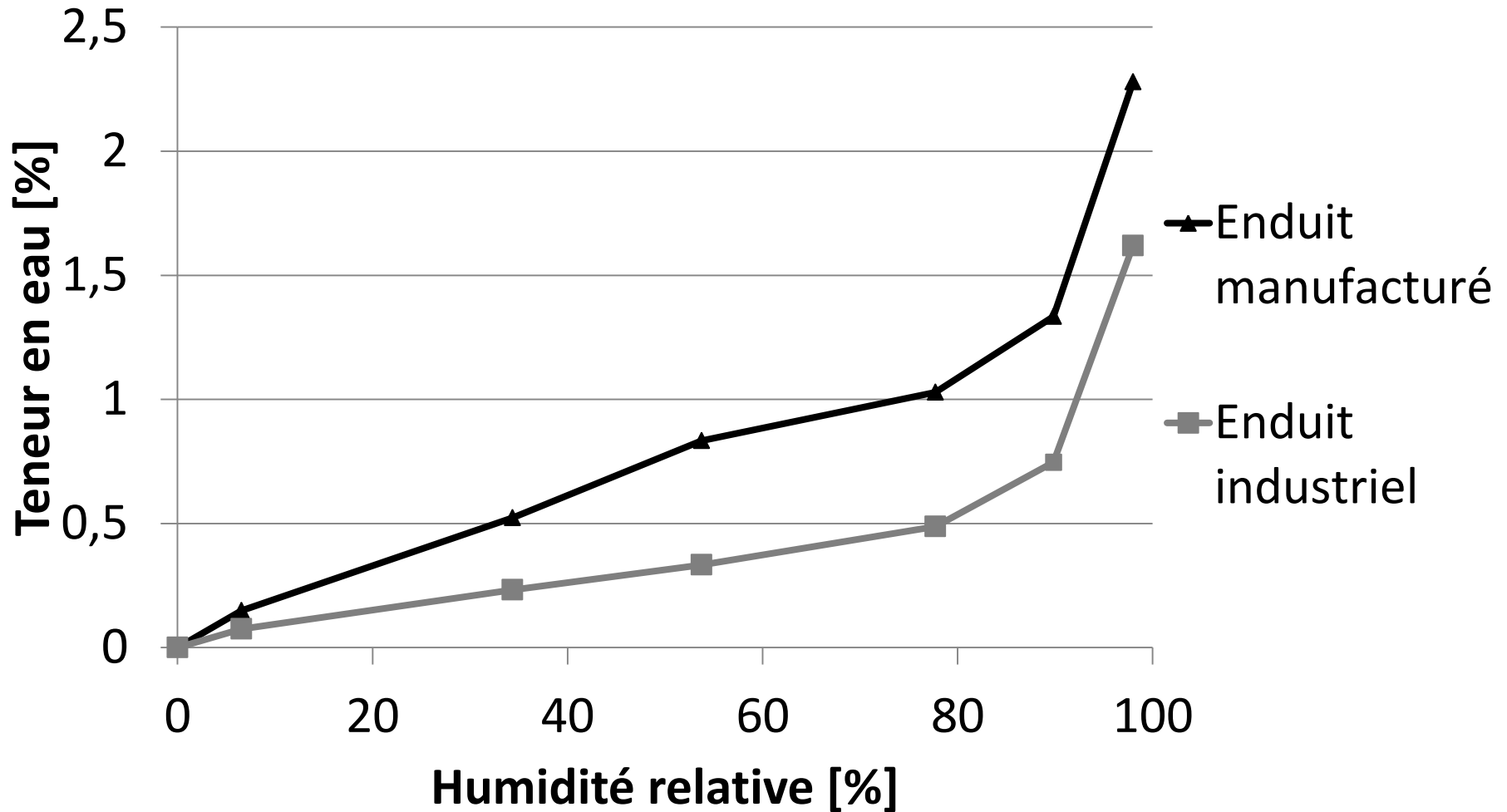
# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline + pressure plate)



# Propriétés hygrothermiques (protocole)



# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline + pressure plate)

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline + pressure plate)
  - Perméabilité à la vapeur sèche et humide

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

- Sur
- M
- M
- C
- p
- P



e

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline + pressure plate)
  - Perméabilité à la vapeur sèche et humide

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline + pressure plate)
  - Perméabilité à la vapeur sèche et humide
  - Absorption capillaire

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline + pressure plate)
  - Perméabilité à la vapeur sèche et humide
  - Absorption capillaire
  - Absorption d'eau totale

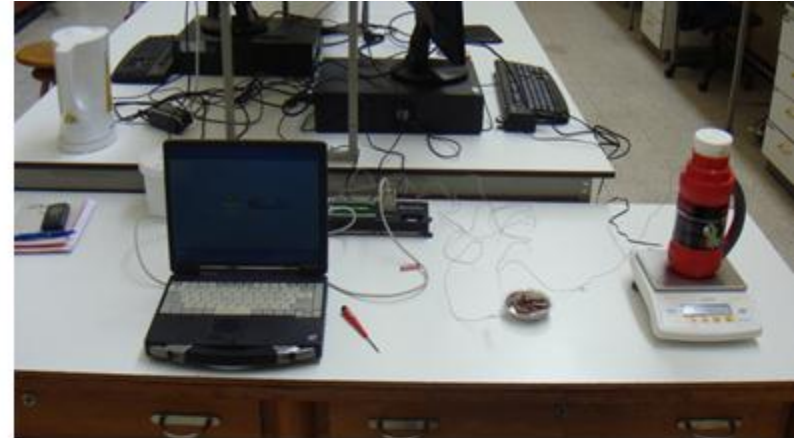
# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline + pressure plate)
  - Perméabilité à la vapeur sèche et humide
  - Absorption capillaire
  - Absorption d'eau totale
  - Mesure de la chaleur massique



# Propriétés hygrothermiques (protocole)



# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les deux enduits
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité (Pycnométrie)
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline + pressure plate)
  - Perméabilité à la vapeur sèche et humide
  - Absorption capillaire
  - Absorption d'eau totale
  - Mesure de la chaleur massique

# Propriétés hygrométriques (protocole)

---

# Propriétés hygrométriques (protocole)

---

- Sur les ballots

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité

<b>Echantillons</b>	<b>Pycnométrie à l'azote [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Masse volumique apparente [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Porosité déduite</b>
<b>Paille</b>	1501	100	93%

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité

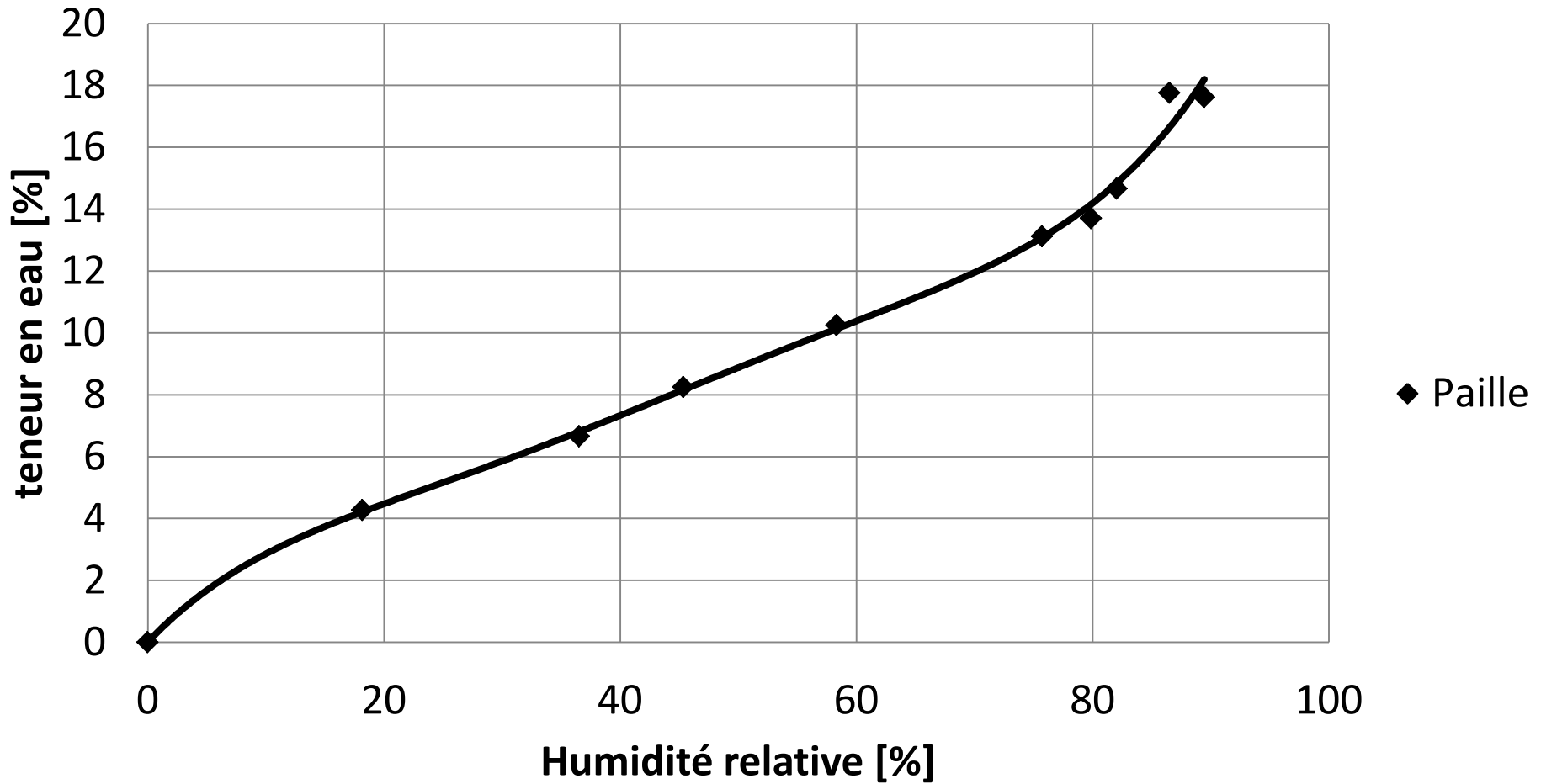


# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)

# Propriétés hygrothermiques (protocole)



# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)

# Propriétés hygrométriques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)
  - Perméabilité à la vapeur

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Suivi

- 
- 
- 
- 



# Propriétés hygrométriques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)
  - Perméabilité à la vapeur

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)
  - Perméabilité à la vapeur
  - Absorption capillaire

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

- Sur
- M
- M
- C
- P
- A





# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)
  - Perméabilité à la vapeur
  - Absorption capillaire

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)
  - Perméabilité à la vapeur
  - Absorption capillaire
  - Absorption d'eau totale

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

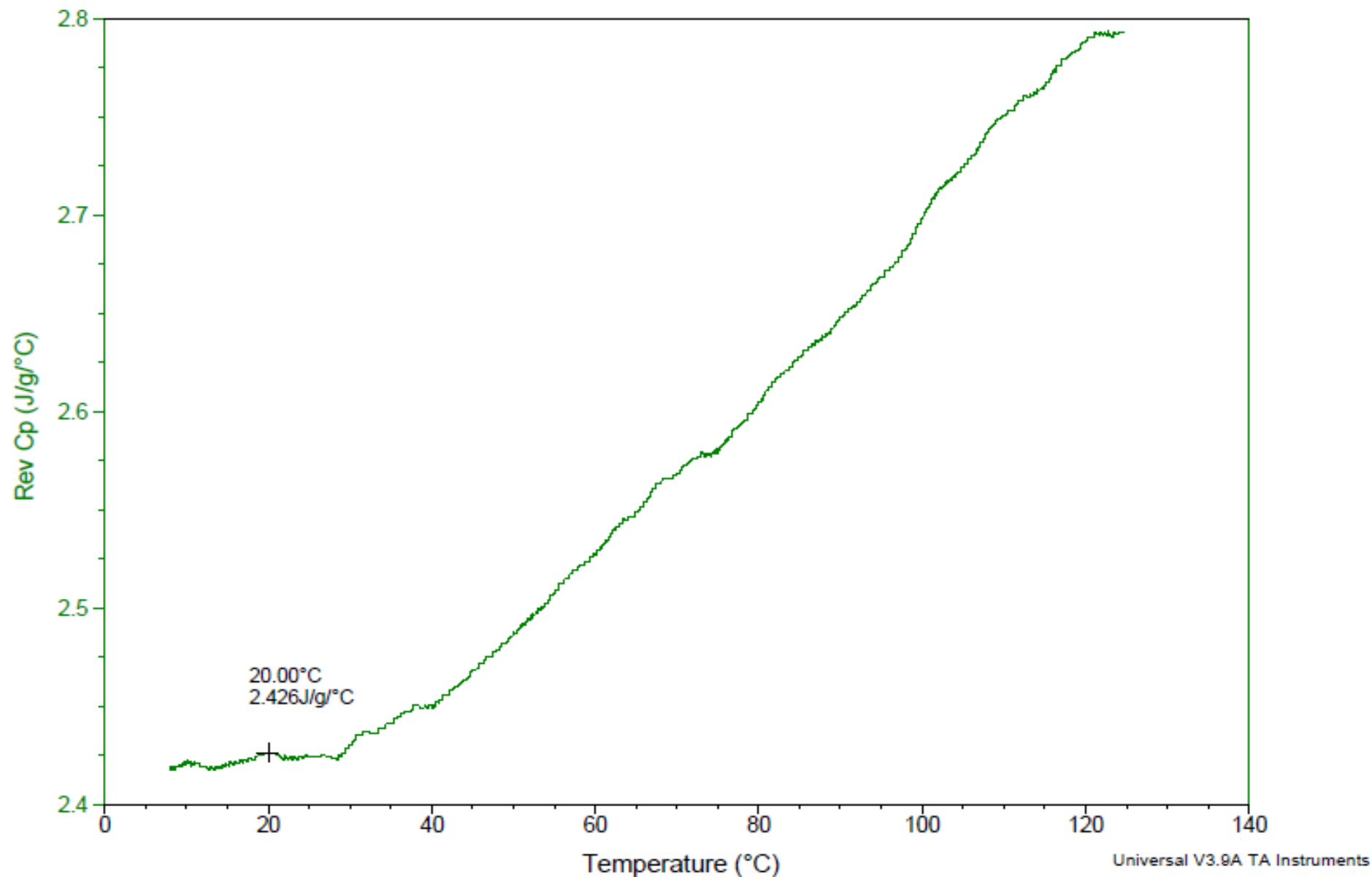
---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)
  - Perméabilité à la vapeur
  - Absorption capillaire
  - Absorption d'eau totale
  - Mesure de la chaleur massique par ATD

Sample: paille  
Size: 3.4900 mg  
Method: paille R1.5A0.5P100  
Comment: mod R1.5A0.5P100 alh

# DSC

File: 20130117.001 paille modulée R1.5 A0.5...  
Operator: Lynn  
Run Date: 17-Jan-13 08:41  
Instrument: 2920 MDSC V2.6A



# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)
  - Perméabilité à la vapeur
  - Absorption capillaire
  - Absorption d'eau totale
  - Mesure de la chaleur massique par ATD

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots
  - Mesure de la masse volumique
  - Mesure de la porosité
  - Courbe de sorption à 23°C (solution saline)
  - Perméabilité à la vapeur
  - Absorption capillaire
  - Absorption d'eau totale
  - Mesure de la chaleur massique par ATD
  - Mesure de la conductivité thermique

# Propriétés hygrothermiques (protocole)

---

- Sur les ballots



um

°C

ass

té

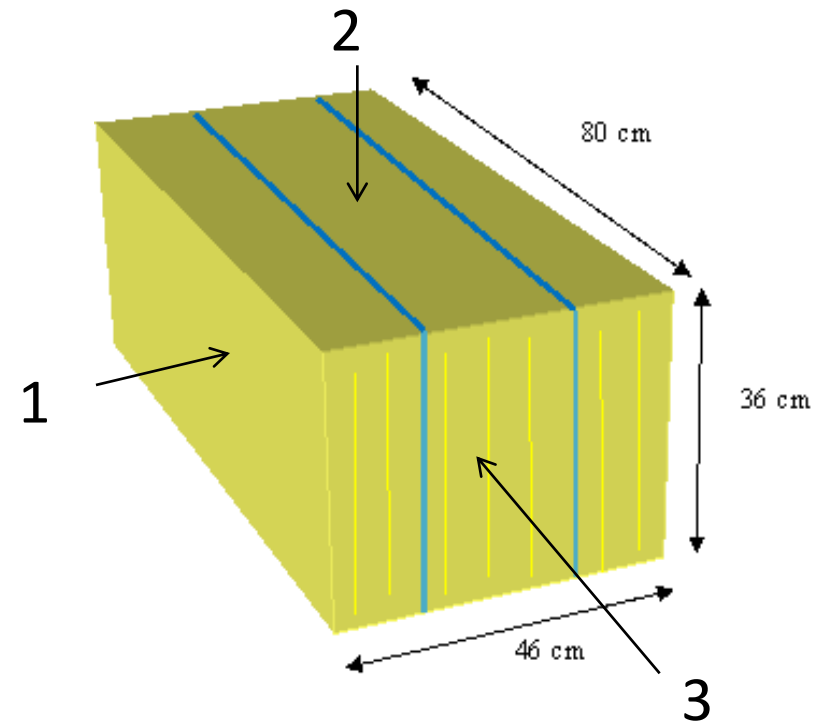
# Conductivité thermique d'un ballot de paille

---



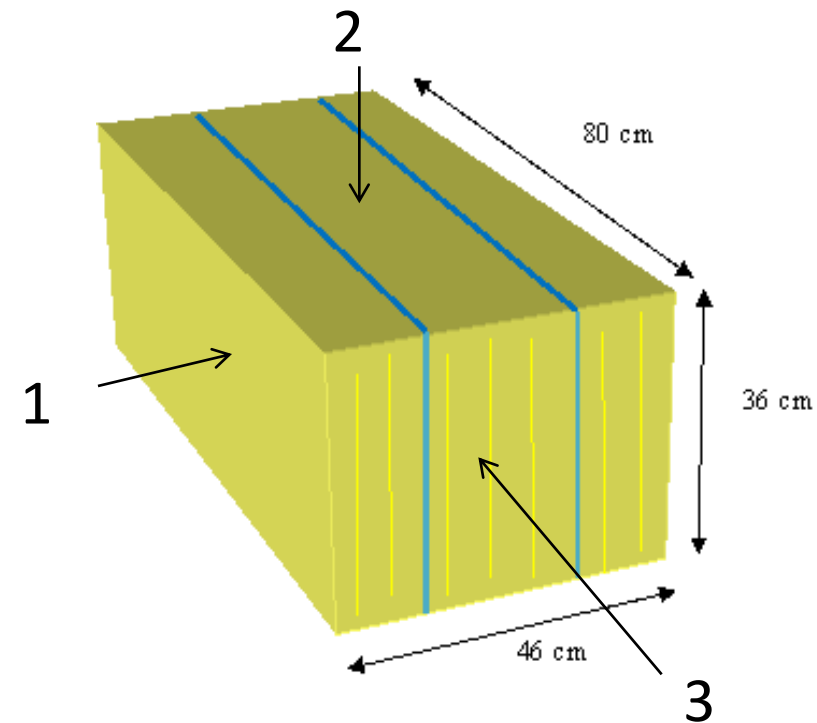
# Conductivité thermique d'un ballot de paille

---



# Conductivité thermique d'un ballot de paille

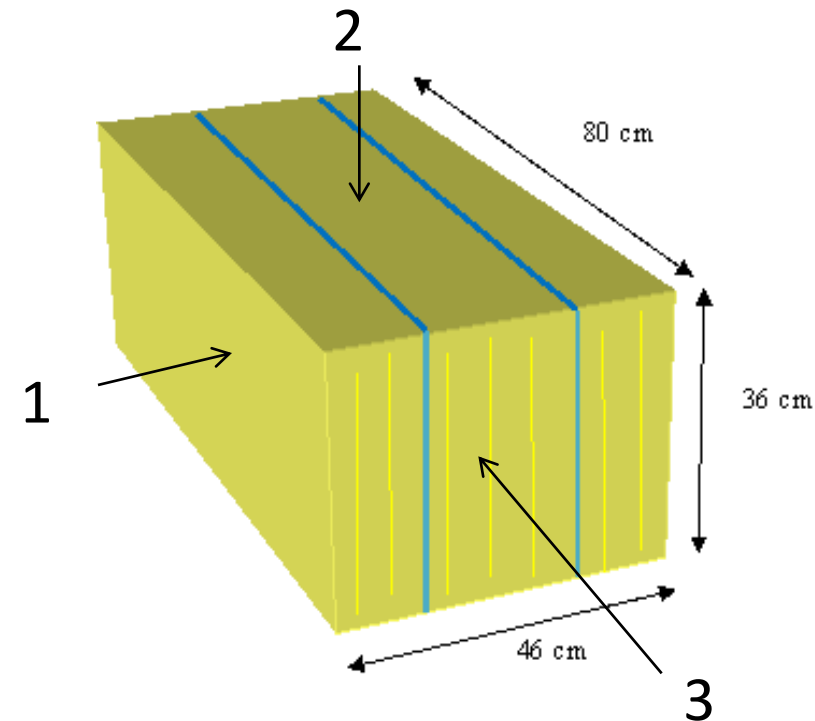
Orientation du flux	Ep. [cm]	$\lambda$ sec [W/m.K]
---------------------	----------	-----------------------



Le  $\lambda$  a été mesuré à une température moyenne de 20°C.

# Conductivité thermique d'un ballot de paille

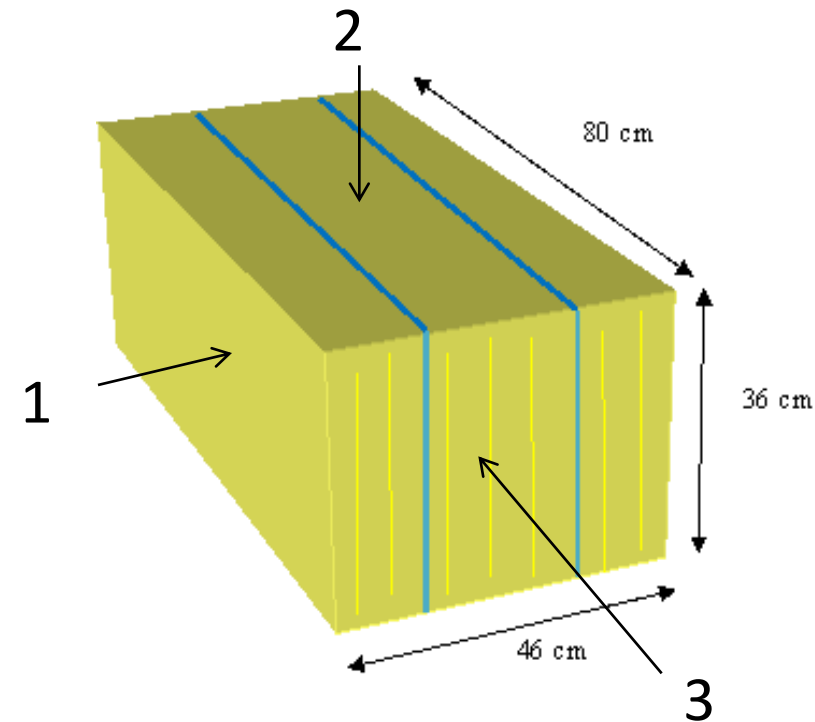
Orientation du flux	Ep. [cm]	$\lambda$ sec [W/m.K]
1	46	0,0635 (1 <sup>ère</sup> mesure) 0,0621 (2 <sup>ème</sup> mesure)



Le  $\lambda$  a été mesuré à une température moyenne de 20°C.

# Conductivité thermique d'un ballot de paille

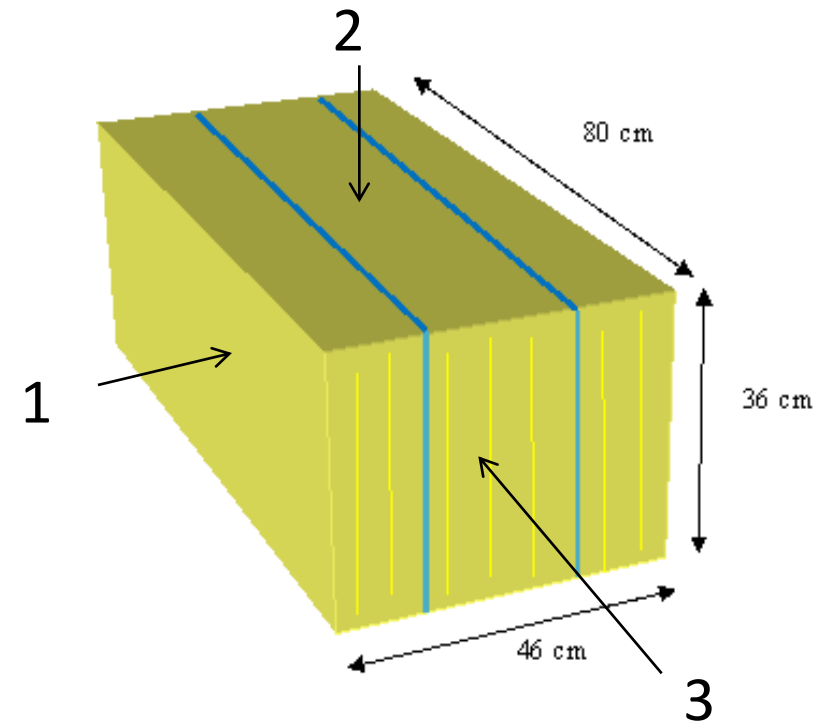
Orientation du flux	Ep. [cm]	$\lambda$ sec [W/m.K]
1	46	0,0635 (1 <sup>ère</sup> mesure) 0,0621 (2 <sup>ème</sup> mesure)
2	38	0,0682



Le  $\lambda$  a été mesuré à une température moyenne de 20°C.

# Conductivité thermique d'un ballot de paille

Orientation du flux	Ep. [cm]	$\lambda$ sec [W/m.K]
1	46	0,0635 (1 <sup>ère</sup> mesure) 0,0621 (2 <sup>ème</sup> mesure)
2	38	0,0682
3	10	0,0461



Le  $\lambda$  a été mesuré à une température moyenne de 20°C.

# Tableaux des résultats

---

# Tableaux des résultats

Paramètre	Unité	Ballot de Paille	
		Ballot testé	Référence
Masse volumique	[kg.m <sup>-3</sup> ]	100	100 (Agriculteur)
Porosité	[%]	93	90 (Wihan J.)
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau « humide »	[-]	Essai en cours	2 (Wihan J.)
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau « sèche »	[-]	Essai en cours	2 (Wihan J.)
Absorption capillaire	[kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1/2</sup> ]	0,0125 à 0,0175*	0,05 (Wufi)
Absorption totale	[%]	203,9	100 (Wufi)
Chaleur massique	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	2426	2000 (Wihan J.)
Conductivité thermique	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0,046 à 0,068*	0,04 à 0,08 (en fonction des auteurs)

# Tableaux des résultats

Paramètre	Unité	Ballot de Paille		Enduit		
		Ballot testé	Référence	Enduit n°1	Enduit n°2	Référence
Masse volumique	[kg.m <sup>-3</sup> ]	100	100 (Agriculteur)	1752	2051	1600-2000
Porosité	[%]	93	90 (Wihan J.)	34,2	24,8	30 (Wufi)
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau « humide »	[-]	Essai en cours	2 (Wihan J.)	13,1	18,4	8 (Whian J.)
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau « sèche »	[-]	Essai en cours	2 (Wihan J.)	10,2	18,5	8 (Whian J.)
Absorption capillaire	[kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1/2</sup> ]	0,0125 à 0,0175*	0,05 (Wufi)	0,072	Essai en cours	0,068 (Staube)
Absorption totale	[%]	203,9	100 (Wufi)	21,1	8,8	8 (Wufi) mais ici bonne corrélation avec les mesures pF
Chaleur massique	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	2426	2000 (Wihan J.)	820	750	850 (Wihan J.)
Conductivité thermique	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0,046 à 0,068*	0,04 à 0,08 (en fonction des auteurs)			1 (Argilus)



# Simulation

---

# Simulation

---

- Logiciel utilisé: Wufi Pro 4.2 (climat extérieur → climat d'Uccle (BXL))

# Simulation

---

- Logiciel utilisé: Wufi Pro 4.2 (climat extérieur → climat d'Uccle (BXL))
- Trois types de parois ont été comparés :

# Simulation

---

- Logiciel utilisé: Wufi Pro 4.2 (climat extérieur → climat d'Uccle (BXL))
- Trois types de parois ont été comparés :
  - **la paroi Paille-Tech** : composée (de l'extérieur à l'intérieur) de 1,6 cm d'Agepan, 46 cm de paille, 4 cm d'enduit industriel et 1,5 cm d'une couche de finition à la chaux

# Simulation

---

- Logiciel utilisé: Wufi Pro 4.2 (climat extérieur → climat d'Uccle (BXL))
- Trois types de parois ont été comparés :
  - **la paroi Paille-Tech** : composée (de l'extérieur à l'intérieur) de 1,6 cm d'Agepan, 46 cm de paille, 4 cm d'enduit industriel et 1,5 cm d'une couche de finition à la chaux
    - utilisation des caractéristiques mesurées expérimentalement

# Simulation

---

- Logiciel utilisé: Wufi Pro 4.2 (climat extérieur → climat d'Uccle (BXL))
- Trois types de parois ont été comparés :
  - **la paroi Paille-Tech** : composée (de l'extérieur à l'intérieur) de 1,6 cm d'Agepan, 46 cm de paille, 4 cm d'enduit industriel et 1,5 cm d'une couche de finition à la chaux
    - utilisation des caractéristiques mesurées expérimentalement
  - **une paroi en parpaing de béton isolée par l'extérieur** (même coefficient de transfert thermique que la paroi en paille :  **$U=0,149$   $W.m^{-2}.K$** )

# Simulation

---

- Logiciel utilisé: Wufi Pro 4.2 (climat extérieur → climat d'Uccle (BXL))
- Trois types de parois ont été comparés :
  - **la paroi Paille-Tech** : composée (de l'extérieur à l'intérieur) de 1,6 cm d'Agepan, 46 cm de paille, 4 cm d'enduit industriel et 1,5 cm d'une couche de finition à la chaux
    - utilisation des caractéristiques mesurées expérimentalement
  - **une paroi en parpaing de béton isolée par l'extérieur** (même coefficient de transfert thermique que la paroi en paille :  **$U=0,149$   $W.m^{-2}.K$** )
  - **une paroi en parpaing de béton isolée par l'extérieur** ayant un coefficient de transfert thermique réglementaire en Wallonie :  **$U=0,336$   $W.m^{-2}.K$**

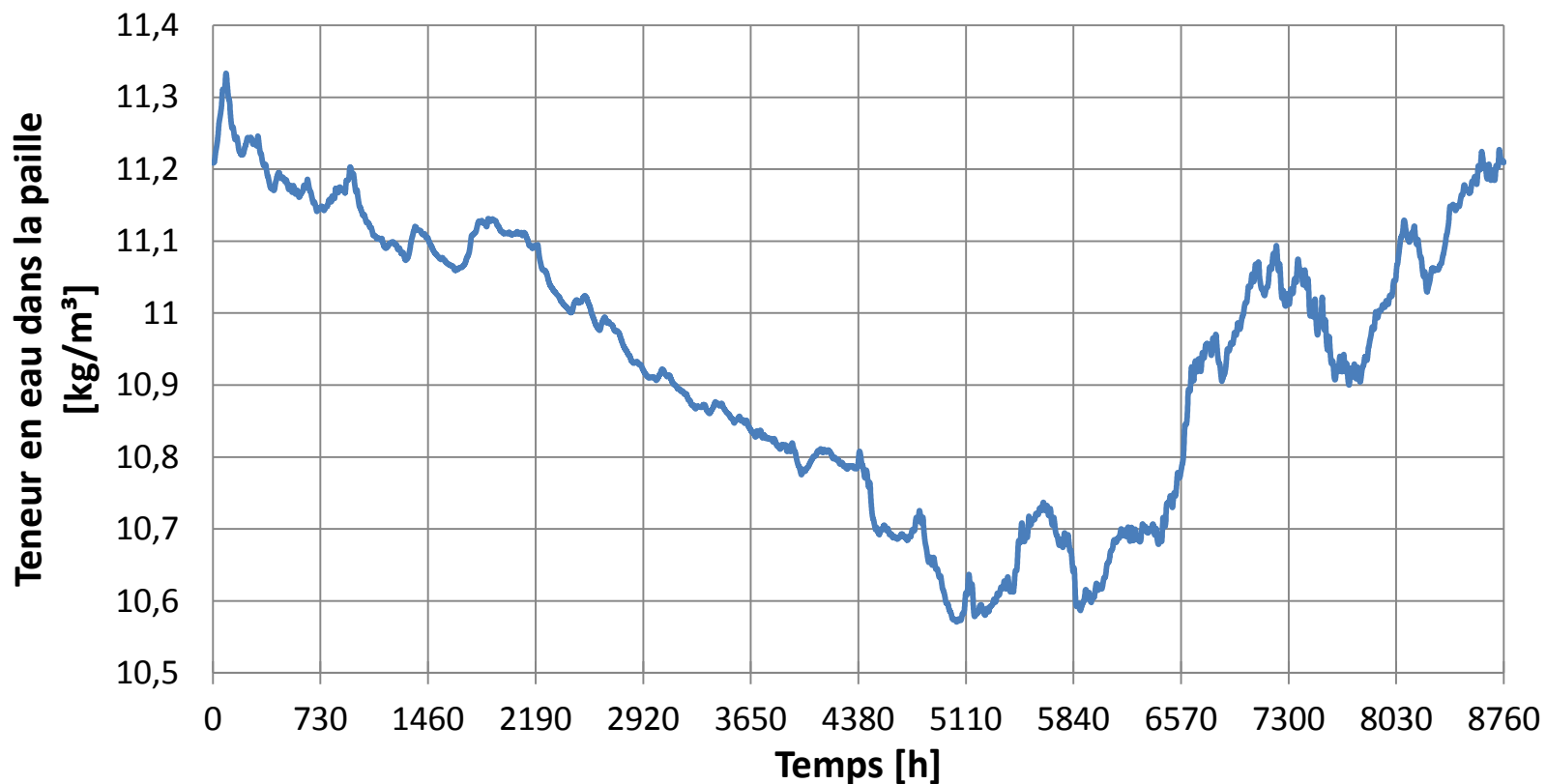
# Simulation

---



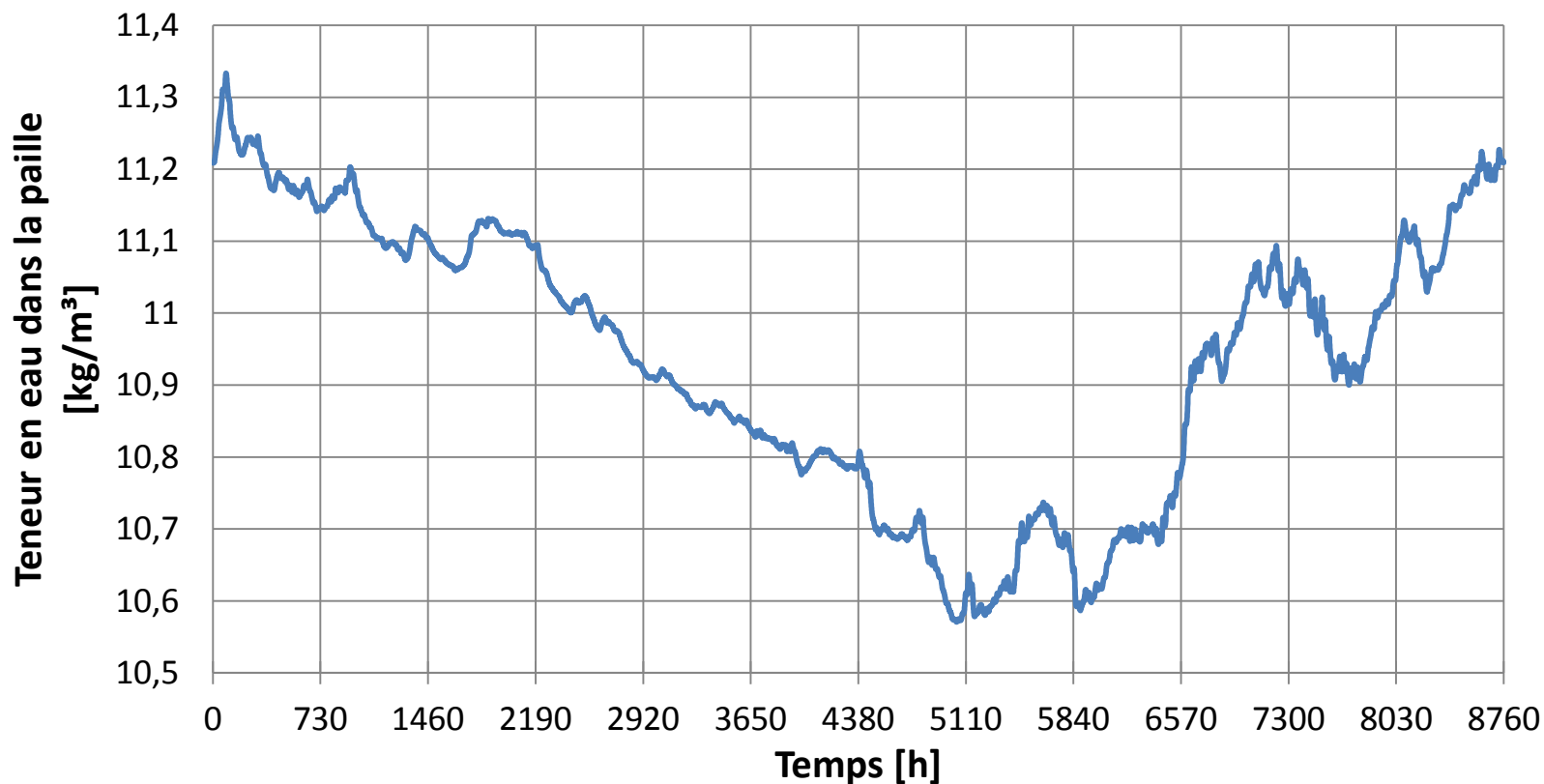
# Simulation

Evolution de la teneur en eau dans la paille



# Simulation

Evolution de la teneur en eau dans la paille



**< 25 kg/m<sup>3</sup> → pas de décomposition**

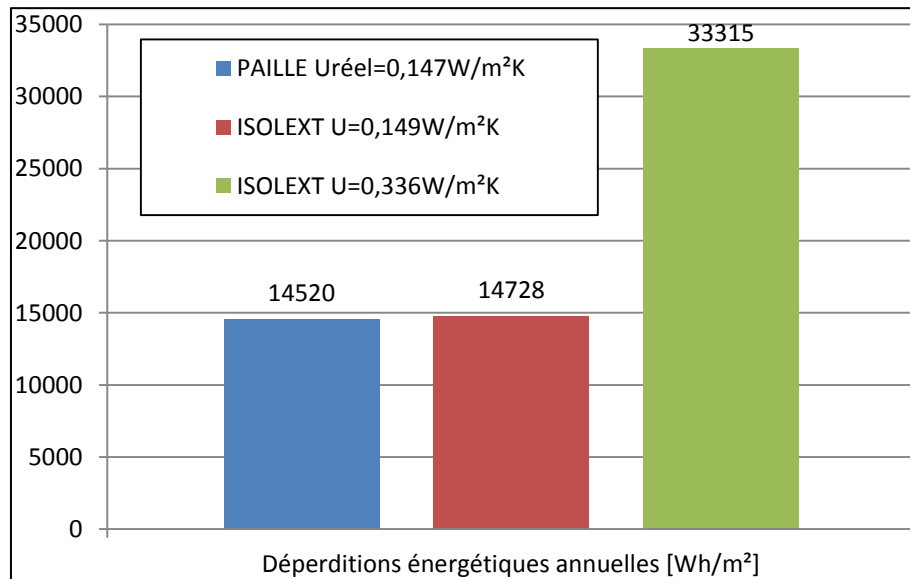
# Simulation

---

# Simulation

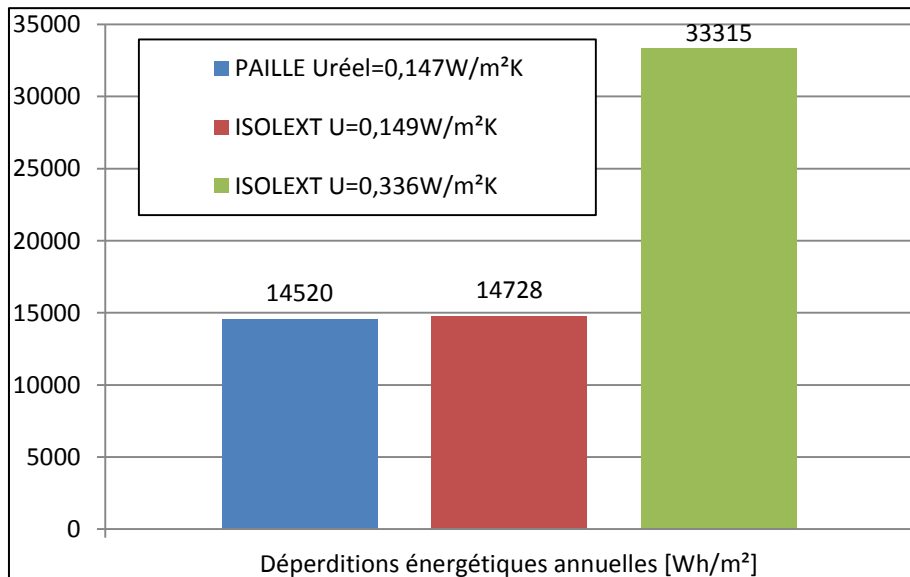
---

## Déperditions énergétiques annuelles

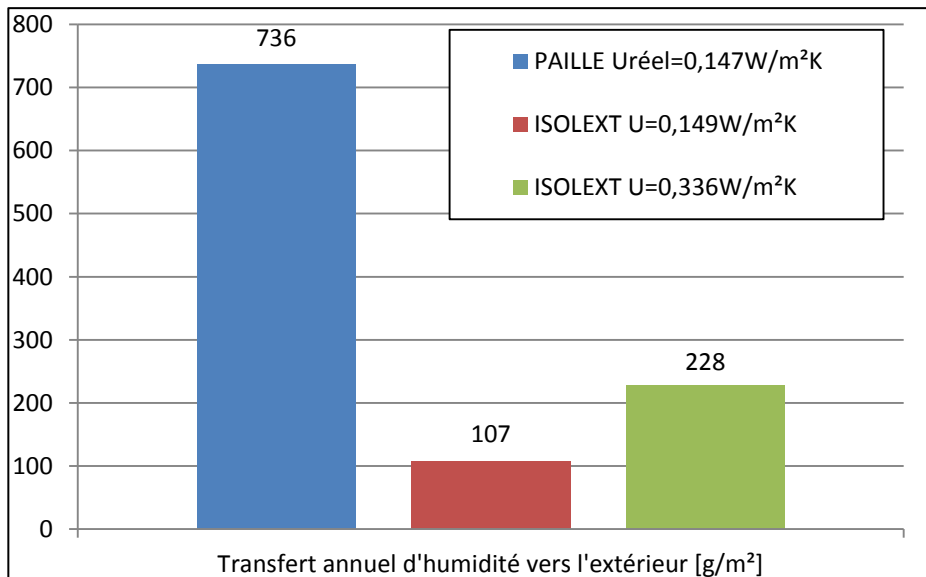


# Simulation

## Dépense énergétique annuelle



## Transfert annuel d'humidité vers l'extérieur



# Conclusion

---

# Conclusion

---

- Les propriétés hygrothermiques des enduits (isotherme d'adsorption et perméabilité à la vapeur) sont fortement liées à leurs propriétés physiques et minéralogiques

# Conclusion

---

- Les propriétés hygrothermiques des enduits (isotherme d'adsorption et perméabilité à la vapeur) sont fortement liées à leurs propriétés physiques et minéralogiques
- La conductivité thermique de la paille est fonction de l'orientation du ballot (**attention aux interprétations trop rapides des valeurs de la littérature**)



# Conclusion

---

- Les propriétés hygrothermiques des enduits (isotherme d'adsorption et perméabilité à la vapeur) sont fortement liées à leurs propriétés physiques et minéralogiques
- La conductivité thermique de la paille est fonction de l'orientation du ballot (**attention aux interprétations trop rapides des valeurs de la littérature**)
- La paille est une alternative compétitive qui conduit à des économies d'énergie qui vont au-delà de la réglementation en vigueur en Belgique

# Remerciement

---

## Merci à tous pour votre attention

Merci à la Région wallonne (DG04 et DG06) pour le financement du projet aPROpaille



Merci à tous les partenaires du projet:

